

Инженерная школа энергетики

Направление подготовки 13.03.02 - Электроэнергетика и электротехника (бакалавриат)

Отделение Электроэнергетики и электротехники

Профиль Электропривод и автоматика

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Частотно-регулируемый электропривод механизма подъёма мостового крана грузоподъемностью 35 тонн

УДК 62-83-52:621.874

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
З-5Г5А1	Тошболтаев Шавкат Мумин угли		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ляпунов Д.Ю.	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Кащук И.В.	к.т.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Мезенцева И.Л.			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

И. о. зав. кафедрой- руководи- теля ОЭЭ ИШЭ	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ивашутенко А.С.	к.т.н.		

Планируемые результаты обучения по ООП

Код результата	Результат обучения
Р 1	Применять соответствующие гуманитарные, социально-экономические, математические, естественно-научные и инженерные знания, компьютерные технологии для решения задач расчета и анализа <i>электрических устройств, объектов и систем</i> .
Р 2	Уметь формулировать задачи в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> , анализировать и решать их с использованием всех требуемых и доступных ресурсов.
Р 3	Уметь проектировать <i>электроэнергетические и электротехнические системы и их компоненты</i> .
Р 4	Уметь планировать и проводить необходимые экспериментальные исследования, связанные с определением параметров, характеристик и состояния <i>электрооборудования, объектов и систем электроэнергетики и электротехники</i> , интерпретировать данные и делать выводы.
Р 5	Применять современные методы и инструменты практической инженерной деятельности при решении задач в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> .
Р 6	Иметь практические знания принципов и технологий <i>электроэнергетической и электротехнической</i> отраслей, связанных с особенностью проблем, объектов и видов профессиональной деятельности профиля подготовки на предприятиях и в организациях – потенциальных работодателях.
Р 7	Использовать знания в области менеджмента для управления комплексной инженерной деятельностью в области <i>электроэнергетики и электротехники</i>
Р 8	Использовать навыки устной, письменной речи, в том числе на иностранном языке, компьютерные технологии для коммуникации, презентации, составления отчетов и обмена технической информацией в областях <i>электроэнергетики и электротехники</i> .
Р 9	Эффективно работать индивидуально и в качестве члена или лидера команды, в том числе междисциплинарной, в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> .
Р 10	Проявлять личную ответственность и приверженность нормам профессиональной этики и нормам ведения комплексной инженерной деятельности.
Р 11	Осуществлять комплексную инженерную деятельность в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> с учетом правовых и культурных аспектов, вопросов охраны здоровья и безопасности жизнедеятельности.
Р 12	Быть заинтересованным в непрерывном обучении и совершенствовании своих знаний и качеств в области <i>электроэнергетики и электротехники</i> .

Инженерная школа энергетики

Отделение Электроэнергетики и электротехники

Направление подготовки 13.03.02 - Электроэнергетика и электротехника (бакалавриат)

Профиль Электропривод и автоматика

УТВЕРЖДАЮ:

**И. о. зав. кафедрой- руководителя
ОЭЭ ИШЭ**

_____ А.С. Ивашутенко
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
3-5Г5А1	Тошболтаеву Шавкату Мумин угли

Тема работы:

Частотно-регулируемый электропривод механизма подъёма мостового крана грузоподъемностью 35 тонн	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№58-27/с от 27.02.2020г.

Срок сдачи студентом выполненной работы:	29.05.2020г.
--	--------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i>	Кран мостовой опорный грузоподъемностью 35 т., режим работы – циклический. Требования к механизму подъема: диапазон регулирования D=1:100, при плавном регулировании скорости в момент пуска и торможения.
--	---

<p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<p>Обзор и современное состояние электрооборудования мостовых кранов, постановка задачи; выбор оборудования и расчет системы управления электропривода механизма подъема; выбор оборудования и расчет системы управления электропривода механизма передвижения; исследование работы мостового крана с помощью имитационной модели.</p>
<p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Структурная схема электропривода подъема мостового крана Графики переходных процессов подъема</p>
<p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</p>	
Раздел	Консультант
«Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»	Кащук Ирина Вадимовна
«Социальная ответственность»	Мезенцева Ирина Леонидовна
<p>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</p>	
<p>Заключение</p>	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	20.03.2020г.
--	--------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ляпунов Д.Ю.	к.т.н.		20.03.2020г.

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г5А1	Тошболтаев Шавкат Мумин угли		20.03.2020г.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
 федеральное государственное автономное
 образовательное учреждение высшего образования
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Инженерная школа энергетики

Направление подготовки 13.03.02 - Электроэнергетика и электротехника (бакалавриат)

Отделение Электроэнергетики и электротехники

Профиль Электропривод и автоматика

Период выполнения весенний семестр 2019 /2020 учебного года

Форма представления работы:

Бакалаврская работа

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	29.05.2020г.
--	--------------

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
22.05.2020	Основная часть	60
15.05.2020	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	20
18.05.2020	Социальная ответственность	20

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ляпунов Д.Ю.	К.Т.Н.		

СОГЛАСОВАНО:

И. о. зав. кафедрой- руководителя ОЭЭ ИШЭ

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Ивашутенко А.С.	К.Т.Н.		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа содержит 127 с., 45 рисунков, 29 таблиц, 23 источник, 2 приложения.

Ключевые слова: подъёмные механизмы, электрические краны, механизмы подъёма, регулируемый электропривод, асинхронный двигатель, преобразователь частоты, система управления электропривод, оптимизация контура, структурная схема, имитационная модель.

Цель работы –определение пути модернизации существующих систем электропривода механизмов кранов, проектирование и исследование асинхронного частотно-регулируемого электропривода механизма подъема крана, удовлетворяющего техническим условиям и требованиям.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word. 2007. Расчеты произведены в программной среде MathCAD 2007. Имитационное моделирование выполнено с использованием программы Simulink/Matlab.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	9
1. ТИПЫ КРАНОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ	11
1.2.1. Подъемно-транспортные машины и механизмы	11
1.2.2. Конструкции кранов	12
1.3 Режимы работы мостовых кранов	13
1.4 Определение группы классификации (режим) кранов и механизмов в целом	15
2. ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕХАНИЗМА ПОДЪЕМА КРАНА КАК ОБЪЕКТА АВТОМАТИЗАЦИИ	20
2.1 Электропривод механизма подъема как объект автоматизации	21
2.2 Технические характеристики механизма подъема крана	23
2.3 Обоснование применения частотно-регулируемого электропривода	24
3. ВЫБОР ЭЛЕМЕНТОВ СИЛОВОГО КАНАЛА ЭЛЕКТРОПРИВОДА И РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ	28
3.1 Выбор электродвигателя и расчет параметров	28
3.1.1 Расчетные параметры электродвигателя	30
3.1.2 Определение параметров схемы замещения электродвигателя по каталожным данным	31
3.1.3 Расчет и построение естественной механической и электромеханической характеристик электродвигателя	36
3.1.4 Механическая система электропривода подъема	39
3.1.5 Параметры элементов механической системы привода	40
3.1.6 Определение заданной области работы	42
3.2. Расчет предельных характеристик разомкнутой системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель	44
3.2.1. Определение максимальной и минимальной частоты инвертора	45
3.3 Расчет механических и электромеханических характеристик разомкнутой системы	45
3.4 Выбор преобразователя частоты	49
3.5 Параметры преобразователя частоты	50
3.6 Проверка правильности выбора преобразователя	53
3.7 Проверка обеспечения заданной области работы	54
3.8 Структурная схема силового канала электропривода	56
3.9 Определение максимального момента при подъеме и спуске в системе векторного управления, максимального ускорения и максимального усилия в канате	58
4. ОПТИМИЗАЦИЯ САУ ЭЛЕКТРОПРИВОДА МЕХАНИЗМА ПОДЪЕМА ..	60
4.1 Структурная схема линеаризованной САУ РЭП	60
4.2 Оптимизация контура тока	64
4.2.1 Структурная схема и параметры элементов контура	64
4.3 Оптимизация контура потокосцепления	65
4.3.1 Структурная схема и параметры элементов контура	65
4.4 Оптимизация контура скорости	66

4.4.1 Структурная схема и параметры элементов контура.....	66
5 АНАЛИЗ НЕЛИНЕЙНОЙ САУ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ОДНОМАССОВОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ.....	68
5.1 Контур потокосцепления	69
5.2 Контур скорости.....	72
5.3 Имитационная модель нелинейной САУ электропривода механизма подъема	76
5.4 Имитационные исследования частотно–регулируемого асинхронного электропривода механизма подъема крана.....	81
ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ».....	86
6 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение ...	87
6.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	88
6.1.1 Анализ конкурентных технических решений.....	88
6.1.2 SWOT анализ.....	89
6.2 Планирование научно-исследовательских работ	91
6.2.1 Структура работ в рамках научного исследования.....	91
6.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения.....	92
6.2.3 Бюджет научно-технического исследования.....	96
6.2.3 Расчет материальных затрат научно-технического исследования.....	96
6.2.4 Расчет амортизации специального оборудования.....	97
6.2.5 Основная заработная плата исполнителей темы	98
6.2.6 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления).....	100
6.2.7 Накладные расходы	100
6.3 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	102
ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»	106
7 Социальная ответственность	107
7.2 Правовые и организационные вопросы	107
7.2.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства	107
7.2.2 Анализ вредных и опасных факторов.....	109
7.3 Экологическая безопасность	116
7.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях.....	118
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	122
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	123
Приложение А	126
Приложение Б	127

ВВЕДЕНИЕ

Многие промышленные предприятия, активно использующие электрические грузоподъемные краны, сталкиваются с проблемой несоответствия подъемного оборудования современным техническим требованиям. В кранах, изготавливаемых серийно и находящихся в эксплуатации, привод главного подъема осуществляется двигателями постоянного тока с системой регулирования от полупроводниковых преобразователей или асинхронными двигателями с фазным ротором с параметрическим регулированием за счет изменения сопротивления резисторов, подключаемых к контактным кольцам фазного ротора [1]. Используемое для изменения скорости реостатное регулирование отличается крайне низкой энергетической эффективностью. По некоторым оценкам в электроприводах механизмов подъема до 70 % потребляемой электроэнергии может уходить на обогрев воздуха, причем не только при спуске, но и при подъеме груза [2].

Подавляющее большинство грузоподъемных кранов оборудовано недорогой и привычной для обслуживания системой управления электроприводом на базе релейно–контакторных панелей, которая далека от совершенства, характеризуется зависимостью скорости опускания груза от его массы, негативно влияет на ресурс работы механической части крана и требует значительных расходов по поддержанию работоспособности.

Среди направлений повышения эффективности использования кранового оборудования можно выделить два основных: снижение энергопотребления и повышение надежности. Использование частотно-регулируемого электропривода на базе асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором позволяет решить обе задачи достаточно невысокими затратами и является на сегодняшний день наиболее эффективным способом модернизации кранового оборудования. Преимуществами применения частотно-регулируемого электропривода по сравнению с другими схемами управления двигателями являются:

- повышение качества и значительная рационализация системы управления;

- автоматическое передвижение груза по заданной программе, т.е. введение крана в систему АСУ ТП;
- возможность согласованного действия нескольких кранов по заданной программе, например при монтажно-сборочных работах;
- увеличение надежности и срока службы, как самого привода, так и всех его механизмов;
- упрощение процесса обслуживания;
- экономия электроэнергии;
- создание предпосылок для дальнейшего совершенствования, как самих кранов, так и систем управления: введение дистанционного управления, ликвидация приборов контроля грузоподъемности, снижение передаточного отношения редуктора, ликвидация полиспастов и т.д.

1. ТИПЫ КРАНОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

1.2.1. Подъемно-транспортные машины и механизмы

Подъемно-транспортные машины и механизмы являются основными средствами механизации и автоматизации погрузо-разгрузочных работ во всех цехах СП.ЭРДЭНЭТ. В связи с интенсификацией технологических процессов, доля времени на подъемно-транспортные операции значительно возросла. Резкое повышение производительности труда, которое крайне необходимо во время перехода экономики на новые условия развития и управления, может быть достигнуто путем механизации и автоматизации подъемно-транспортных и установочных операций, которые менее автоматизированы, чем технологические.

Подъемно-транспортные машины (ПТМ) весьма металлоемки, и следовательно требуют большого количества материальных и трудовых затрат, поэтому необходимо создать мало металлоемкие, совершенные, надежные и рациональные конструкции. Подъемно-транспортное оборудование является неотъемлемой частью практически любой схемы механизации любого производственного процесса, в каждой отрасли экономики. Применением подъемно-транспортных машин достигается ликвидация ручных погрузо-разгрузочных работ и исключение тяжелого труда при выполнении основных и вспомогательных операций.

Мостовыми называются краны, у которых грузоподъемный механизм расположен на тележке, перемещающейся по подвижной пролетной конструкции — мосту, а мост передвигается по рельсам, расположенным на подкрановых балках, опирающихся на консоли колонн здания или колонн специальной эстакады. Мостовые краны используются практически во всех сферах промышленной деятельности человека. Монтажные схемы мостовых кранов допускают их использование, как в закрытых помещениях, так и на открытых местностях при любых условиях окружающей среды. Это обстоятельство способствует тому, что они широко используются на складах, заводах различного профиля и таможенных терминалах. Их недостатком является то, что они привязаны к зданию или эстакаде и не могут работать без пути, поднятого над обслуживаемой поверхностью;

положительно в их конструкции то, что они используют строительную высоту здания.

1.2.2. Конструкции кранов

Конструкция крана включает в себя:

- несущий элемент;
- грузоподъемное устройство, состоящее из гибкого подъемного органа (стального каната или цепи) и грузовой лебедки. Для обеспечения безопасности в работе грузоподъемный механизм оснащается различными ограничителями (грузоподъемности, грузового момента, хода грузозахватного органа); грузозахватный орган, который может быть неавтоматического действия (крюк) (грейфер,)или автоматического действия (электромагнит)

По конструктивным особенностям несущего элемента краны делятся на три основные группы: краны стрелового типа, краны мостового типа, краны кабельного типа.

- Кран стрелового типа: несущим элементом крана стрелового типа является стрела. Грузозахватный орган крана стрелового типа подвешен непосредственно к стреле либо к перемещающейся по стреле грузовой тележке. Разновидности крана стрелового типа: кран стреловой самоходный, кран портальный, кран мачтовый, кран консольный, кран башенный, кран плавучий, кран велосипедный.
- Кран мостового типа: несущим элементом крана мостового типа является балка, выполненная в виде моста. Грузозахватный орган крана мостового типа подвешен к перемещающейся по мосту грузовой тележке или тали. Разновидности крана мостового типа: кран мостовой опорный, кран мостовой подвесной, кран козловой.
- Кран кабельного типа: несущим элементом крана кабельного типа являются закрепленные на двух опорах канаты. Грузозахватный орган крана

кабельного типа подвешен к перемещающейся по канатам грузовой тележке. Опоры крана кабельного типа могут быть стационарными или передвижными.

1.3 Режимы работы мостовых кранов

При работе крана происходит постоянное чередование направления движения крана, тележки и крюка. Так, работа механизма подъема состоит из процессов подъема и опускания груза и процессов подъема и опускания пустого крюка. Для увеличения производительности крана используют принцип совмещения операций. Время пауз, в течение которых двигатель не включен и механизм не работает, используется для навешивания груза на крюк и освобождения крюка и для подготовки к следующему процессу работы механизма. Каждый процесс движения, в свою очередь, может быть разделен на периоды неустановившегося движения (в течение которых происходит разгон или замедление движущихся масс груза и механизма) и период движения с установившейся скоростью. Время полного цикла работы механизма грузоподъемной машины складывается из суммы времени пуска $2/p$, суммы времени движения с установившейся скоростью $2/u$, суммы времени торможения $2t$ и суммы времени пауз $2/0$, т. е. Для мостовых кранов общего назначения с машинным приводом установлены режимы работы: легкий, средний и тяжелый. Для каждого механизма режим работы определяется отдельно, режим работы крана в целом устанавливается по механизму главного подъема. Этот же режим учитывается и при расчете металлоконструкций.

Режимы работы механизмов кранов устанавливаются в зависимости от следующих факторов:

- а) коэффициента использования механизма по грузоподъемности:
- б) коэффициента годового использования механизма:
- в) коэффициента суточного использования механизма:

Для электрооборудования величина вычисляется для промежутка времени не свыше 10 мин, для механизмов — в течение 1 ч, поэтому можно принимать для электрооборудования $PВ = (10) 100\%$, для механизмов $PВ = (60) 100\%$. Технические характеристики разрабатываемых кранов должны в максимально возможной степени соответствовать будущим условиям их эксплуатации. Поэтому очевидной является необходимость достаточно точного определения режимов их работы — одной из основ для расчета механизмов и металлоконструкций. Этому в значительной степени способствуют статистические наблюдения. Нормативами в зависимости от относительной длительности работы и относительной нагрузки механизмы мостовых кранов делятся на четыре группы. Относительная длительность работы характеризует среднее время работы в часах в течение рабочего дня. Для механизмов, используемых нерегулярно, принимается относительная длительность работы.

Три вида относительных нагрузок уточняют характер эксплуатации механизма:

- 1 (легкая) — редкая работа с максимальной нагрузкой или регулярная работа при значительно меньших нагрузках;
- 2 (средняя) — регулярная работа при малых, средних и максимальных нагрузках;
- 3 (тяжелая) — работа с нагрузками, близкими к максимальным. По мере роста парка кранов и повышения требования к их экономичности появилась необходимость в максимальном приспособлении их номенклатуры к разнообразным потребностям отраслей народного хозяйства. Группа режима работы определяется в зависимости от класса использования механизма и класса его нагружения. Класс нагружения механизма определяется величиной коэффициента нагрузки. Производительность — масса груза, в тоннах, переработанная в единицу времени (час, смену, сутки и т. д.) является важнейшим показателем технико-экономических данных крана.

1.4 Определение группы классификации (режим) кранов и механизмов в целом

1. Группы классификации (режима) определяются в соответствии с требованиями ИСО 4301/1.

2. Группа классификации (режима) кранов в целом определяется по табл. 1 в зависимости от класса использования ($U_0—U_9$), характеризующегося величиной максимального числа циклов за заданный срок службы, и режима

$$K_p = \sum_{i=1}^n \left[\frac{C_i}{C_T} \cdot \left(\frac{P_i}{P_{\max}} \right)^m \right], \text{ нагружения (Q1—Q4).}$$

2.1. Режим нагружения крана характеризуется величиной коэффициента распределения нагрузок K_p , определяемого по формуле

где C_i — среднее число рабочих циклов с частным уровнем массы груза P_i ;

C_T — суммарное число рабочих циклов со всеми грузами:

$$C_T = \sum_{i=1}^n C_i;$$

P_i — значения частных масс отдельных грузов (уровня нагрузки) при типичном применении крана;

P_{\max} — масса наибольшего груза (номинальный груз), который разрешается поднимать краном;

$$m = 3$$

3. Группа классификации (режима) механизмов в целом определяется по табл. 2 в зависимости от класса использования механизма ($T_0—T_9$), характеризующегося общей продолжительностью использования механизма (в часах), и режима нагружения (L1—L4).

3.1. Режим нагружения механизма характеризуется величиной коэффициента распределения нагрузки K_m , определяемого по формуле

$$K_m = \sum_{i=1}^n \left[\frac{t_i}{t_T} \cdot \left(\frac{P_i}{P_{\max}} \right)^m \right],$$

где t_i — средняя продолжительность использования механизма при частных уровнях нагрузки P_i ;

t_T — общая продолжительность при всех частных уровнях нагрузки;

$$t_T = \sum_{i=1}^n t_i;$$

P_i — значения частных нагрузок (уровни нагрузок), характерных для применения данного механизма;

P_{\max} — значение наибольшей нагрузки, приложенной к механизму;

$m = 3$

Таблица 1

Группы классификации (режима) кранов в целом

Режим нагружения	Коэффициент распределения нагрузок K_m	Класс использования									
		U ₀	U ₁	U ₂	U ₃	U ₄	U ₅	U ₆	U ₇	U ₈	U ₉
		максимальное число рабочих циклов									
		1,6 · 10 ⁴	3,2 · 10 ⁴	6,3 · 10 ⁴	1,25 · 10 ⁵	2,5 · 10 ⁵	5 · 10 ⁵	1 · 10 ⁶	2 · 10 ⁶	4 · 10 ⁶	более 4 · 10 ⁶
Q1 - легкий	0,125			A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
Q2 - умеренный	0,250		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	
Q3 - тяжелый	0,500	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8		
Q4 - весьма тяжелый	1,000	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8			

Таблица 2

Группы классификации (режима) механизмов целом

Режим нагружения	Коэффици- ент распре- деления нагрузки K_m	Класс использования									
		T_0	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	T_9
		общая продолжительность использования, ч									
		200	400	800	1600	3200	6300	12500	25000	50000	100000
L1 - легкий	0,125			M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8
L2 - умеренный	0,250		M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	
L3 - тяжелый	0,500	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8		
L4 - весьма тяжелый	1,000	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8			

Современное состояние кранового электрооборудования и электропривода подъемных кранов электрический двигатель постоянного или переменного тока с релейно-контакторным управлением, в котором функции управления, защиты и регулирования скорости осуществляется при помощи различного рода крановых и защитных панелей. Регулирование скорости в таких электроприводах реализуется за счет введения в силовые цепи добавочных сопротивлений.

Основным недостатком такого способа регулирования является его низкая энергоэффективность, особенно при работе на скоростях ниже номинальной. Кроме того, этот способ требует использования двигателя с фазным ротором, если идет речь о приводе переменного тока. Такого рода двигатели, как и двигатели постоянного тока, имеет в составе вращающиеся токоведущие части, что, в свою очередь, требует более тщательного и трудоемкого обслуживания. Кроме того, данный способ не позволяет получить значительного диапазона регулирования скорости. Низкая эффективность использования релейно-контакторной аппаратуры общеизвестна. В настоящее время известны примеры использования более совершенные способы коммутации силовых цепей: тиристорные ключи, твердотельные реле, бездуговая коммутация и т.п. Однако принцип регулирования скорости остается прежний и в основном базируется на использовании асинхронных двигателей с фазным ротором.

В настоящее время самым распространенным двигателем промышленных электроприводов является асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором. Это самый простой, самый надежный и самый дешевый электродвигатель в широком диапазоне частоты вращения и мощности. Самым эффективным и самым распространенным среди глубокорегулируемых асинхронных электроприводов является частотно-регулируемый электропривод на основе преобразователя частоты.

Применение частотно-регулируемого асинхронного электропривода в механизмах подъемно-транспортного оборудования является эффективным

методом повышения технологичности производства. Использование таких приводов позволяет:

1. Значительно (до 40%) снизить энергопотребление крана, что особенно актуально при постоянно растущих тарифах на энергоносители;
2. Осуществить разгон и торможение двигателя плавно, по желаемому закону от времени, при варьировании временем разгона и торможения от долей секунды до десятков минут;
3. Повысить комфортные показатели при движении крана и долговечность механического оборудования благодаря плавности переходных процессов;
4. Защитить двигатель от перегрузок по току, перегрева, утечек на землю и от обрывов в цепях питания двигателей;
5. Снизить эксплуатационные расходы на капитальный ремонт оборудования за счет значительного снижения динамических нагрузок в элементах кинематической цепи;
6. Изменять скорости и ускорения движения механизмов крана применительно к конкретным технологическим задачам.

2. ТЕХНИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МЕХАНИЗМА ПОДЪЕМА КРАНА КАК ОБЪЕКТА АВТОМАТИЗАЦИИ

Большинство грузоподъемных кранов характеризуется постоянно меняющимися условиями использования, поэтому механизмы кранов, имеющие в своем составе электроприводы, должны быть в максимальной степени приспособлены к постоянно видоизменяющейся работе с грузами, разнообразными по массе, размерам, форме, и в условиях производственных помещений или на открытых грузовых площадках. Электропривод механизма главного подъема является наиболее ответственным. Он должен обеспечивать плавное трогание, равномерный подъем и опускание груза, торможение, а также удержание груза в заторможенном состоянии. Обычно для подъема груза используют редукторный привод с полиспастной подвеской. Подъем осуществляется на скоростях не более 1 м/с и при ускорениях 0,1-0,5 м/с². Скоростные параметры определяют производительность механизмов, их энергоемкость и технологические условия работы. Механизмы подъема кранов должны иметь малые установочные и посадочные скорости для обеспечения безопасной посадки грузов и грузозахватных органов либо для снижения нагрузки на механические тормоза в целях обеспечения необходимого уровня их износостойкости. Нагрузка механизма подъема изменяется как по абсолютному значению от номинального до холостого хода, так и по направлению в режиме тяги (подъема) и торможения (спуска). При принятых скоростях подъема [3] во время пуска и торможения в системах привода возникают ударные нагрузки, значительно превышающие номинальные значения, поэтому должны быть предусмотрены специальные меры по их ограничению.

2.1 Электропривод механизма подъема как объект автоматизации

В промышленности большое распространение имеют мостовые краны. Мостовой кран предназначен для погрузочно-разгрузочных работ различных грузов внутри цеха. Данный кран может выполнять погрузочно-разгрузочные работы и вне цеха, что достигается продлением подкрановых путей за пределы цеха. Такая конструкция дает преимущество в том, что можно осуществлять разгрузку оборудования и материалов для производства с транспорта без его заезда в цех. При этом в цехе не нужно оставлять свободное пространство под заезд транспорта, а использовать его под технологический процесс.

Кран является механизмом циклического действия. Цикл работы состоит из перемещения краном груза в требуемое место.

Кинематическая схема механизма представлена на рисунке 1.

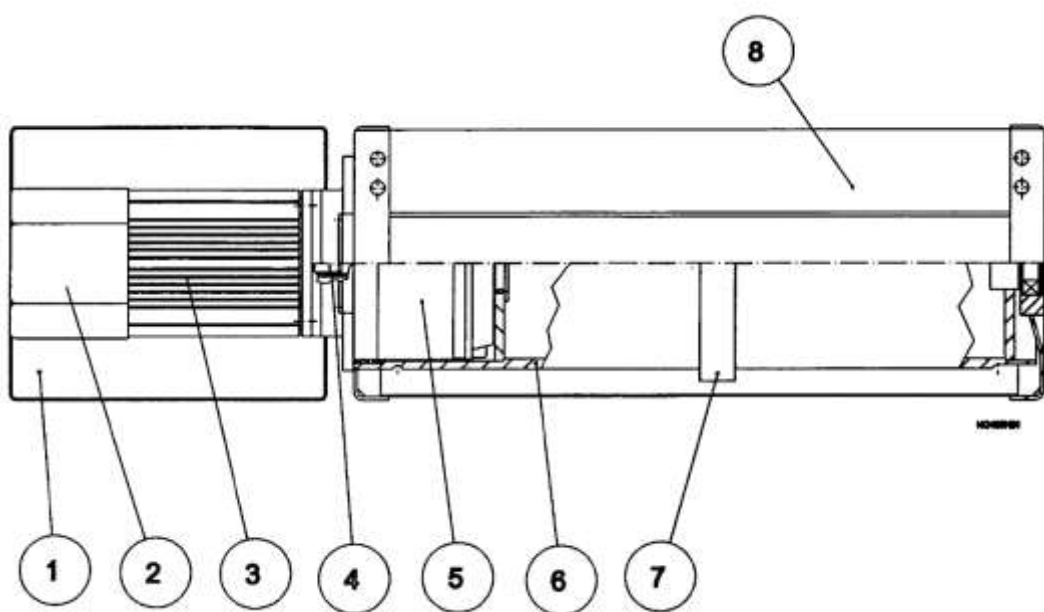


Рисунок 1 – Кинематическая схема электропривода подъема крана:

1 – корпус; 2 – электромагнитный тормоз; 3 – электродвигатель; 4 – муфта;
5 – редуктор; 6 – барабан; 7 – канатоукладчик; 8 – ось барабана

Работа механизма подъема заключается в следующем: питание подается одновременно на электродвигатель 3 и на электромагнитный тормоз 2.

При подаче питания на электромагнитный тормоз он разжимается, и двигатель начинает вращаться. Через муфту 4 вращение передается на редуктор 5.

Редуктор приводит в движение барабан 6. При вращении барабана вдоль него двигается канатоукладчик 7. Канатоукладчик, двигаясь вдоль оси барабана, помогает укладывать каната в пазы барабана. Это необходимо для равномерной укладки каната. В случае если канат будет неравномерно укладываться, возможно, его запутывание и дальнейшая работа будет осложнена.

В данном механизме применен трехступенчатый редуктор с передаточным числом 71. Общий вид редуктора приведен на рисунке 2.

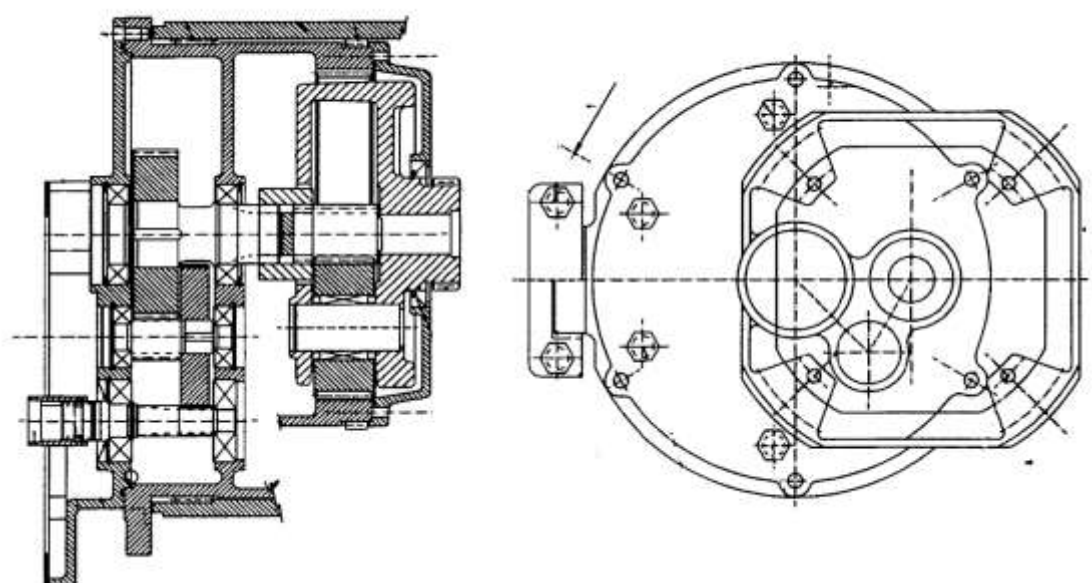


Рисунок 2 – Редуктор механизма подъема крана

2.2 Технические характеристики механизма подъема крана

Кинематическая схема механизма подъема крана приведена на рисунке 3

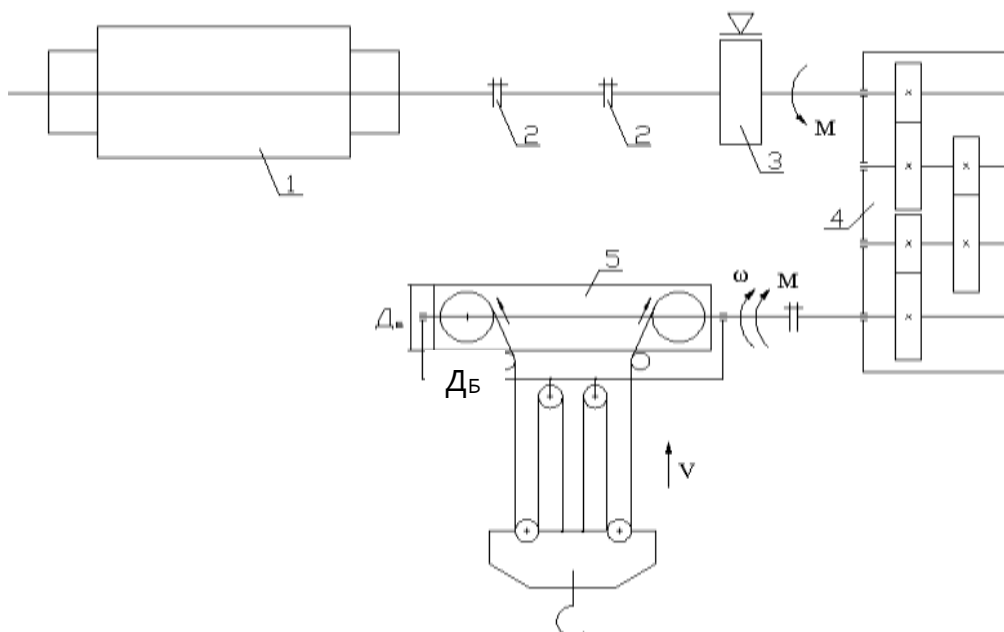


Рисунок 3 – Кинематическая схема механизма подъема крана: 1- двигатель; 2 – муфта; 3 – тормоз; 4 – редуктор; 5 – барабан; 6 – полиспастная система

Параметры механизма подъема крана приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Параметры механизма подъема крана

Наименование, ед. изм.	Обозначение	Значение
Грузоподъемность, т	$m_{гр}$	35
Масса грузозахватывающего устройства, кг	m_y	6350
Высота подъема, м	h	28
Максимальная скорость подъема, м/мин	$V_{макс}$	7,5
Барабан		
Диаметр навивки каната, мм	$D_б$	590
Длина, мм	$L_б$	5040
Канат		
Диаметр, мм	$d_{кан}$	32
Длина, м	$l_{кан}$	28
Разрывное усилие, кН	$F_{к макс}$	263
Полиспастная система		
Количество блоков полиспаста	$a_{пол}$	2
Число ветвей каната полиспаста	$i_{пол}$	3
Редуктор		
Количество ступеней редуктора		3
Передаточное число редуктора	$i_{ред}$	71

Определение дополнительных параметров механизма подъема

Максимальная угловая частота вращения барабана

$$\omega_{б.макс} = \frac{V_{б.макс}}{R_б \cdot 60} = \frac{2 \cdot V_{б.макс}}{D_б \cdot 60} = \frac{2 \cdot 22,5}{0,59 \cdot 60} = 1,2712 \frac{\text{рад}}{\text{с}}, \quad (1)$$

где
$$V_{б.макс} = i_{пол} \cdot V_{макс} = 3 \cdot 7,5 = 22,5 \frac{\text{м}}{\text{мин}}.$$

Максимальная рабочая угловая частота вращения двигателя

$$\omega_{р.макс} = \omega_{б.макс} \cdot i_{ред} = 1,2712 \cdot 71 = 90,25 \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (2)$$

2.3 Обоснование применения частотно-регулируемого электропривода

Многие промышленные предприятия, активно использующие электрические грузоподъемные краны, сталкиваются с проблемой несоответствия подъемного оборудования современным техническим требованиям. Большинство находящихся в эксплуатации крановых электроприводов выполнено на базе асинхронных двигателей с фазным ротором, которые управляются силовыми контроллерами или низковольтными комплектными устройствами (панелями управления). Основным достоинством таких электроприводов является простота их использования, низкая стоимость и ремонтпригодность. Однако эти электроприводы не лишены и весьма существенных недостатков.

Вот некоторые из них:

- большие потери энергии, обусловленные низким $\cos\phi$ и КПД;
- выход из строя электродвигателей из-за перекосов в роторных цепях, вызванных потерей контактов в цепях сопротивлений или контакторах ускорений;
- ударное изменение момента двигателей, и как следствие динамические перегрузки узлов крана, обусловленные ступенчатым выведением сопротивлений из цепи ротора;

- невозможность получения посадочной скорости в электроприводах механизмов подъема с силовыми контроллерами;
- отсутствие режима силового спуска пустого крюка и легких грузов в электроприводах механизмов подъема с панелями управления;
- отсутствие электрического торможения в электроприводах механизмов передвижения;
- низкая износостойкость релейно-контакторной аппаратуры;
- большие потери энергии при спуске и торможении электроприводов в интенсивном режиме работы.

Зачастую промышленные предприятия, где установлены краны, изменяют технологию производства и номенклатуру выпускаемой продукции, делают перепланировку производственных и складских помещений, краны управляемые из кабины, переводятся на управление с пола по радиоканалу и т.д.

Сегодня наиболее эффективным методом модернизации электрооборудования крана считается использование частотно-регулируемого электропривода [1].

Использование частотно-регулируемых электроприводов обеспечивает следующие преимущества:

- существенное, до 60%, снижение энергопотребления;
- повышение точности и качества регулирования скорости;
- плавность пуска и торможения увеличивают срок службы всех механических элементов, повышают комфортность управления и обеспечивают сохранность груза;
- асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором дешевле и надежнее двигателей с фазным ротором и двухскоростных двигателей.

Встроенные функции преобразователя позволяют легко интегрировать их в электроприводы подъемно-транспортного оборудования. Преобразователь имеет развитую систему диагностики с выдачей сообщения об ошибках и

сбоях на графический терминал. Функция управления тормозом предназначена для выдачи сигнала на открытие тормоза (по достижении двигателем необходимого момента) и сигнала на наложение тормоза (при снижении скорости до минимального уровня). Для корректировки тока снятия тормоза в зависимости от веса груза может использоваться функция весоизмерения, для чего используется внешний датчик груза (например, из состава ограничителя грузоподъемности).

Разгон и торможение приводов с использованием частотного преобразователя осуществляется по S-образному закону, что обеспечивает плавное нарастание моментов и усилий во всех узлах и механизмах крана. Поскольку управляемое торможение выполняет сам электропривод, а тормоз служит для удержания механизма после полной остановки, существенно уменьшается раскачивание груза после остановки. В процессе разгона и/или торможения электропривода возможно изменение времени пуска и торможения внешним сигналом или по достижении определенной выходной частоты преобразователя. Профиль кривых пуска и торможения позволяют выбрать наиболее подходящий для конкретного механизма закон управления скорости.

Функция позиционирования по конечным выключателям позволяет подключать контакты последних непосредственно к логическим входам преобразователя. Концевые выключатели могут использоваться для предварительного снижения скорости и останова.

Ограничение момента при векторном управлении позволяет формировать требуемую механическую характеристику, причем для двигательного и генераторного режима работы ограничение момента может задаваться индивидуально.

Сложившаяся практика использования частотного электропривода основывается на том, что электроэнергия, генерируемая двигателем при опускании груза или при торможении инерционного механизма, передается на блоки тормозных сопротивлений и преобразуется в тепловую. Торможение с подключением внешнего резистора получило наибольшее распространение в

электроприводах с преобразователями частоты как отечественного, так и зарубежного производства.

У такого способа торможения есть ряд недостатков. Тормозной резистор подключается к каждому преобразователю частоты, что увеличивает стоимость электропривода и ухудшает массогабаритные показатели установки. Энергия торможения, за исключением потерь в элементах электропривода, выделяется в виде тепловой на тормозном резисторе, что приводит к его значительному нагреву и нерациональному использованию электрической энергии. Альтернативой такому нерациональному использованию энергии является применение модулей рекуперации, которые заменяют резисторы в приводах с длительной работой в генераторном режиме или имеющих большую тормозную мощность, как, например, у подъемных и инерционных механизмов. В этом случае энергия торможения электропривода возвращается в питающую сеть.

Сегодня, с развитием преобразовательной техники, с одной стороны, и постоянно растущими тарифами на электроэнергию, с другой стороны, применение модулей рекуперации становится все более актуальным.

Основные качества (преимущества) модулей рекуперации:

- компактность;
- простой ввод в эксплуатацию без необходимости программирования и настройки;
- возможность подключить к звену постоянного тока нескольких преобразователей частоты;
- возможность параллельного подключения до 4 модулей рекуперации;
- благодаря энергосбережению и с учетом стоимости исключенных из схемы тормозных сопротивлений обеспечивается окупаемость в течении 1–2 лет.

Цена комплекта «частотный преобразователь – асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором» сопоставима с ценой других решений, как, к примеру «пусковой дроссель двигатель с фазным ротором».

В целом, применение частотно-регулируемого электропривода является наиболее современным решением для кранового электропривода.

3. ВЫБОР ЭЛЕМЕНТОВ СИЛОВОГО КАНАЛА ЭЛЕКТРОПРИВОДА И РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ

3.1 Выбор электродвигателя и расчет параметров

Частотные преобразователи используются с асинхронными электродвигателями с короткозамкнутым ротором. Зачастую разработчики или изготовители кранов, модернизируя крановый электропривод, применяют для частотно-регулируемого электропривода традиционные электродвигатели крановой серии, имеющие роторы специального исполнения, залитые сплавом повышенного сопротивления. Это продиктовано, в первую очередь, требованиями обеспечения повышенного момента в процессе частых пусков. Для создания удовлетворительного теплового режима принимаются специальные меры по снижению кратности пусковых токов, увеличивается расход активных материалов. Все это приводит к увеличению массы и стоимости двигателя. Система изоляции и подшипниковые узлы серийных двигателей не приспособлены для работы с преобразователями частоты, что приводит к преждевременному выходу из строя обмоток статора, выплавлению стержней ротора, разрушению подшипников и датчиков положения, применяющихся в электроприводе главного подъема. Система управления получается нерациональной из-за необходимости применения более мощных преобразователей частоты и двигателей больших габаритов. Очевидно, что для частотно-регулируемого электропривода необходимо применять специальные двигатели [2].

С учетом вышесказанного, для электропривода механизма подъема крана выбираем асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором крановой серии типа 4МТКМФ225L6У2, адаптированный для работы от преобразователя частоты.

Структура условного обозначения:

4 – порядковый номер серии;

MT – обозначение серии;

M – модернизированный;

L – установочный размер по длине станины;

6 – число пар полюсов;

Y2 – климатическое исполнение.

F – нагревостойкость системы

Технические данные электродвигателя приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Технические данные двигателя 4МТКMF225L6Y2

Типоразмер двигателя	Мощность P_2 , кВт	Синхронная частота вращения n_0 , об/мин	При номинальной нагрузке		
			частота вращения n_n , об/мин	КПД η_n , %	$\cos\varphi_n$
4МТКMF225L6Y2	55	1000	940	87	0,823
$M_{\text{макс}}$	$M_{\text{пуск}}$	$I_{\text{пуск}}$	$J_{\text{дв.}}$ кг·м ²	Степень защиты	Климат. испол.
2200 Н·м	2100 Н·м	820 А	1,02	IP54	Y2

П р и м е ч а н и я

1 Технические характеристики приведены для основного режима работы S3 (PIB = 40 %).

2 Диапазон изменения частоты питания – от 5 до 150 Гц.

3.1.1 Расчетные параметры электродвигателя

Синхронная угловая частота вращения двигателя

$$\omega = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{\pi \cdot 1000}{30} = 104,712 \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (3)$$

Номинальное скольжение двигателя

$$s_H = \frac{n_0 - n_{\text{ном}}}{n_0} = \frac{1000 - 940}{1000} = 0,06. \quad (4)$$

Номинальная частота вращения двигателя

$$\omega_{\text{двн}} = \frac{n_{\text{ном}}}{9,55} = \frac{940}{9,55} = 98,429 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Номинальный ток двигателя

$$I_{\text{IH}} = \frac{P_H \cdot 1000}{3 \cdot U_{\text{IH}} \cdot \cos \varphi_H \cdot \eta_H} = \frac{55000}{3 \cdot 220 \cdot 0,823 \cdot 0,87} = 116,386 \text{ A} \quad (5)$$

Номинальный момент двигателя

$$M_{\text{двн}} = \frac{P_H \cdot 1000}{\omega_{\text{дв.}}} = \frac{55000}{98,429} = 558,777 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (6)$$

Определим кратность максимального и пускового момента двигателя

$$m_{\text{макс}} = \frac{M_{\text{макс}}}{M_{\text{двн}}} = \frac{2200}{558,777} = 3,937; \quad (7)$$

$$m_{\text{пуск}} = \frac{M_{\text{пуск}}}{M_{\text{двн}}} = \frac{2100}{558,777} = 3,758 \quad (8)$$

и кратность пускового тока

$$k_{\text{пуск}} = \frac{I_{\text{пуск}}}{I_{\text{IH}}} = \frac{820}{116,386} = 7,046. \quad (9)$$

3.1.2 Определение параметров схемы замещения электродвигателя по каталожным данным

Параметры схемы замещения асинхронного двигателя, приведенной на рисунке 4, определим по методике, изложенной в [4, часть 8]

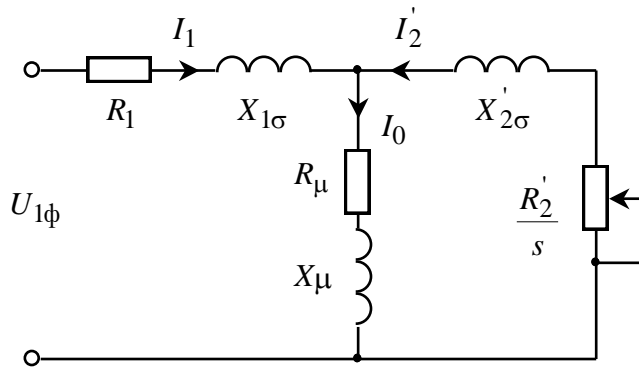


Рисунок 4 – Схема замещения асинхронного двигателя

Ток холостого хода асинхронного двигателя

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - \left(p^* \cdot I_{1H} \cdot \frac{1 - s_H}{1 - p^* \cdot s_H} \right)^2}{1 - \left(p^* \cdot \frac{1 - s_H}{1 - p^* \cdot s_H} \right)}} = \quad (13)$$

$$= \sqrt{\frac{93,298^2 - \left(0,75 \cdot 116,386 \cdot \frac{1 - 0,06}{1 - 0,75 \cdot 0,06} \right)^2}{1 - \left(0,75 \cdot \frac{1 - 0,06}{1 - 0,75 \cdot 0,06} \right)}} = 53,911 \text{ A.}$$

Где

$$I_{11} = \frac{P_H \cdot p^*}{3 \cdot U_{1H} \cdot \cos \varphi_{p^*} \cdot \eta_{p^*}} = \frac{55000 \cdot 0,75}{3 \cdot 220 \cdot 0,77 \cdot 0,87} = 93,298 \text{ A} - \text{Ток статора}$$

двигателя при частичной нагрузке

где

p^* – коэффициент загрузки двигателя, принимаем $p^* = 0,75$;

η_{p^*} – КПД при частичной нагрузке, принимаем $\eta_{p^*} = \eta_H$.

Коэффициент мощности при частичной нагрузке, согласно [4, часть 8].

$$\cos \varphi_{p^*} = 0,99 \cdot \cos \varphi_H = 0,99 \cdot 0,823 = 0,815. \quad (12)$$

Активное сопротивление обмотки ротора, приведенное к обмотке статора асинхронного двигателя

$$R_2' = \frac{A_1}{\left(\beta + \frac{1}{s_K}\right) \cdot C_1} = \frac{0,305}{\left(1 + \frac{1}{0,722}\right) \cdot 1,033} = 0,124 \text{ Ом}. \quad (17)$$

где β – коэффициент, значение которого находится в диапазоне 0,6 – 2,5, принимаем $\beta = 1$.

Определим коэффициенты

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1H}} = 1 + \frac{53,911}{2 \cdot 7,046 \cdot 116,386} = 1,033, \quad (15)$$

$$A_1 = \frac{m \cdot U_{1H}^2 \cdot (1 - s_H)}{2 \cdot C_1 \cdot k_M \cdot P_H} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1 - 0,06)}{2 \cdot 1,033 \cdot 3,937 \cdot 55000} = 0,305. \quad (16)$$

Критическое скольжение

$$s_K = s_H \cdot \frac{k_M + \sqrt{k_M^2 - (1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_M - 1))}}{1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_M - 1)} =$$

$$= 0,06 \cdot \frac{3,937 + \sqrt{3,937^2 - (1 - 2 \cdot 0,06 \cdot (3,937 - 1))}}{1 - 2 \cdot 0,06 \cdot 1 \cdot (3,937 - 1)} = 0,722, \quad (14)$$

Активное сопротивление статорной обмотки можно определить по следующему выражению:

$$R_1 = C_1 \cdot R_2' \cdot \beta = 1,033 \cdot 0,124 \cdot 1 = 0,128 \text{ Ом}. \quad (18)$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания X_K

$$X_K = \gamma \cdot C_1 \cdot R_2' = 0,959 \cdot 1,033 \cdot 0,124 = 0,123 \text{ Ом}. \quad (20)$$

$$\text{Где} \quad \gamma = \sqrt{\left(\frac{1}{s_K^2}\right) - \beta^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{0,722^2}\right) - 1^2} = 0,959, \quad (19)$$

Индуктивное сопротивление статорной обмотки может быть определено по следующему выражению

$$X_{1\sigma} = 0,42 \cdot X_K = 0,42 \cdot 0,123 = 0,0515 \text{ Ом}. \quad (21)$$

Индуктивность обмотки статора, обусловленная потоком рассеяния, в номинальном режиме

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{0,0515}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 163,925 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}. \quad (22)$$

Индуктивное сопротивление роторной обмотки, приведенное к статорной, может быть рассчитано

$$X'_{2\sigma} = \frac{0,58 \cdot X_K}{C_1} = \frac{0,58 \cdot 0,123}{1,033} = 0,069 \text{ Ом}. \quad (23)$$

Индуктивность обмотки ротора, обусловленная потоком рассеяния, в номинальном режиме

$$L'_{2\sigma} = \frac{X'_{2\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{0,069}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 219,168 \cdot 10^{-6} \text{ Гн}. \quad (24)$$

Согласно векторной диаграмме ЭДС ветви намагничивания E_1 , наведенная потоком воздушного зазора в обмотке статора в номинальном режиме, равна:

$$\begin{aligned} E_1 &= \sqrt{(U_{1H} \cdot \cos \varphi_H - I_{1H} \cdot R_1)^2 + (U_{1H} \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_H} - I_{1H} \cdot X_{1\sigma})^2} = \\ &= \sqrt{(220 \cdot 0,823 - 116,386 \cdot 0,128)^2 + (220 \cdot \sqrt{1 - 0,823^2} - 116,386 \cdot 0,0515)^2} = \\ &= 204,373 \text{ В}. \end{aligned} \quad (25)$$

Тогда индуктивное сопротивление контура намагничивания

$$X_\mu = \frac{E_1}{I_0} = \frac{204,373}{53,911} = 3,791 \text{ Ом}. \quad (26)$$

Результирующая индуктивность, обусловленная магнитным потоком воздушного зазора, создаваемым суммарным действием токов статора (индуктивность контура намагничивания)

$$L_\mu = \frac{X_\mu}{2\pi \cdot f_{1H}} = \frac{3,791}{2\pi \cdot 50} = 12,067 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}. \quad (27)$$

Параметры схемы замещения асинхронного двигателя сведем в таблицу 6.

Таблица 6 – Параметры схемы замещения асинхронного двигателя

$R_1,$ Ом	$X_{1\sigma},$ Ом	$L_{1\sigma},$ Гн	$R_2',$ Ом	$X_{2\sigma}',$ Ом	$L_{2\sigma}',$ Гн	$X_\mu,$ Ом	$X_k,$ Ом	$L_\mu,$ Гн
0,128	0,0515	$163,9 \cdot 10^{-6}$	0,124	0,069	$219,16 \cdot 10^{-6}$	3,791	0,123	$12,067 \cdot 10^{-3}$

Критический момент и критическое скольжение двигателя на естественной характеристике

$$M_K = 3 \cdot \frac{U_{1H}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot \left(R_1 + \sqrt{[R_1^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')^2] \cdot \left(1 + \frac{R_1^2}{X_\mu^2} \right)} \right)} =$$

$$= 3 \cdot \frac{220^2}{2 \cdot 104,72 \cdot \left(0,128 + \sqrt{[0,128^2 + (0,0515 + 0,069)^2] \cdot \left(1 + \frac{0,128^2}{3,791^2} \right)} \right)} = \quad (28)$$

$$= 2279,2 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$s_K = R_2' \cdot \sqrt{\frac{\frac{R_1^2}{X_\mu^2} + 1}{R_1^2 + (X_{1\sigma} + X_{2\sigma}')^2}} = 0,124 \cdot \sqrt{\frac{\frac{0,128^2}{3,791^2} + 1}{0,128^2 + (0,0515 + 0,069)^2}} = 0,706. \quad (29)$$

Номинальный электромагнитный момент двигателя

$$M_{\text{эм}} = \frac{3 \cdot U_{1H}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s_H \cdot \left(X_k^2 + \left[\left(R_1 + \frac{R_2'}{s_H} \right)^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'^2}{s_H \cdot X_\mu} \right)^2 \right] \right)} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0,124}{104,712 \cdot 0,06 \cdot \left(0,123^2 + \left[\left(0,128 + \frac{0,124}{0,06} \right)^2 + \left(\frac{0,128 \cdot 0,124^2}{0,06 \cdot 3,791} \right)^2 \right] \right)} = 593,198 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (30)$$

Момент от силы трения на валу электродвигателя

$$\Delta M_{\text{с. ää}} = M_{\text{ÿî. í}} - M_{\text{ää. í}} = 593,198 - 558,777 = 34,421 \text{ Í} \cdot \text{ì}. \quad (31)$$

Оценим адекватность параметров модели и справочных и полученных расчетных параметров электродвигателя. Параметры двигателя, соответствующие справочным данным:

$$I_{\text{дв.н}} = I_{1\text{фн}} = 116,386 \text{ А};$$

$$M_{\text{дв н}} = 558,777 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Параметры двигателя расчетные:

$$I_0 = 53,911 \text{ А};$$

$$M_{\text{эмн}} = 593,198 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

За основные параметры электродвигателя примем значения номинального тока $I_{1\text{фн}} = 116,386 \text{ А}$ и номинального электромагнитного момента $M_{\text{эмн}} = 593,198 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Находятся значения номинального потокосцепления ротора через номинальный электромагнитный момент и расчетные параметры двигателя.

$$\psi_{2\text{н}(1)} = \frac{M_{\text{эмн}}}{\frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \frac{L_\mu}{(L_\mu + L_{2\delta})} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_{1\text{фн}}^2 - I_0^2}}; \quad (34)$$

$$\begin{aligned} \psi_{2\text{н}(1)} &= \frac{593,421}{\frac{3}{2} \cdot 3 \cdot \frac{12,067 \cdot 10^{-3}}{(12,067 \cdot 10^{-3} + 219,168 \cdot 10^{-6})} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{116,386^2 - 53,911^2}} = \\ &= 0,92 \text{ Вб}; \end{aligned}$$

$$\psi_{2\text{н}(2)} = \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot I_\mu \quad (35)$$

$$\psi_{2\text{н}(2)} = \sqrt{2} \cdot 53,911 \cdot 12,067 \cdot 10^{-3} = 0,92 \text{ Вб}.$$

$$\psi_{2\text{н}(1)} = \psi_{2\text{н}(2)}.$$

3.1.3 Расчет и построение естественной механической и электро-механической характеристик электродвигателя

Естественная механическая характеристика асинхронного двигателя рассчитывается, согласно [5] по выражениям:

$$\begin{aligned}
 M(S, f_1) &= \frac{3 \cdot \left[U_{1\Phi H}^2 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1H}} \right)^2 \right]^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1H}} \cdot S \cdot \left(\left(X_{KH} \cdot \frac{f_1}{f_{1H}} \right)^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{S} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{S \cdot X_\mu \cdot \frac{f_1}{f_{1H}}} \right)^2 \right)} = \\
 &= \frac{3 \cdot \left[220^2 \cdot \left(\frac{f_1}{50} \right)^2 \right]^2 \cdot 0,124}{104,71 \cdot \frac{f_1}{50} \cdot s \cdot \left(\left(0,123 \cdot \frac{f_1}{50} \right)^2 + \left(0,128 + \frac{0,124}{s} \right)^2 + \left(\frac{0,128 \cdot 0,124}{s \cdot 3,791 \cdot \frac{f_1}{50}} \right)^2 \right)}; \quad (36) \\
 \omega(s, f) &= \omega_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1H}} \cdot (1 - s).
 \end{aligned}$$

Естественная механическая характеристика двигателя $\omega = f(M)$ при $f_1 = f_{1H} = 50$ Гц приведена на рисунке 5.

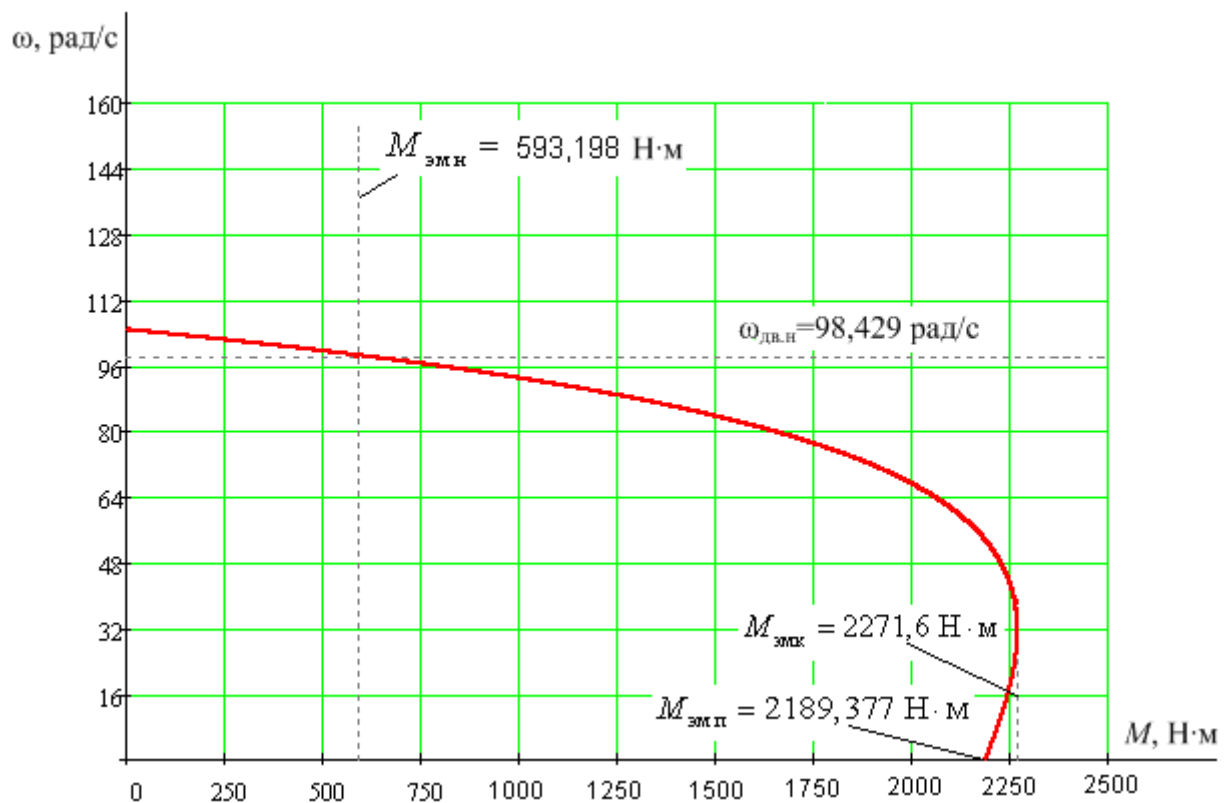


Рисунок 5 – Естественная механическая характеристика АД

По результатам расчета механической характеристики найдены значения электромагнитных моментов двигателя: номинального

$M_{эмн} = 593,198 \text{ Н} \cdot \text{м}$; пускового $M_{эмн\alpha} = 2189,377 \text{ Н} \cdot \text{м}$; критического

$M_{эмк} = 2271,6 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $\omega_k = 31,24 \text{ рад/с}$.

По полученным результатам определяем

– кратность пускового момента

$$m_{\Pi} = \frac{M_{эмн\alpha}}{M_{эмн}} = \frac{2189,377}{593,198} = 3,691; \quad (37)$$

– кратность максимального (критического) момента

$$m_k = \frac{M_{эмк}}{M_{эмн}} = \frac{2271,6}{593,198} = 3,829; \quad (38)$$

– критическое скольжение

$$s_k = \frac{\omega_0 - \omega_k}{\omega_0} = \frac{104,7 - 31,24}{104,7} = 0,702. \quad (39)$$

Естественные электромеханические характеристики двигателя

$I_1(s, f_1)$ и $I_2'(s, f_1)$ рассчитываются по выражениям:

$$I_1(s, f_1) = \sqrt{I_0^2(f_1) + I_2'^2(s, f_1) + 2 \cdot I_0(f_1) \cdot I_2'(s, f_1) \cdot \sin \varphi_2(s, f_1)}; \quad (40)$$

$$I_2'(s, f_1) = \frac{U_1(f_1)}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + \left(X_K \cdot \frac{f_1}{f_{1H}}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_\mu \cdot \frac{f_1}{f_{1H}}}\right)^2}} =$$

$$= \frac{U_1(f_1)}{\sqrt{\left(0,128 + \frac{0,124}{s}\right)^2 + \left(0,123 \cdot \frac{f_1}{50}\right)^2 + \left(\frac{0,128 \cdot 0,124}{s \cdot 3,791 \cdot \frac{f_1}{50}}\right)^2}}; \quad (41)$$

$$I_0(f_1) = \frac{U_1(f_1)}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + X_\mu)^2 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1H}}\right)^2}} = \frac{U_1(f_1)}{\sqrt{0,128^2 + (0,0515 + 3,791)^2 \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1H}}\right)^2}}; \quad (42)$$

$$\sin \varphi_2(s, f_1) = \frac{\frac{f_1}{f_{1H}} \cdot X_K}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + \left(X_K \cdot \frac{f_1}{f_{1H}}\right)^2}} = \frac{\frac{f_1}{f_{1H}} \cdot 0,123}{\sqrt{\left(0,128 + \frac{0,124}{s}\right)^2 + \left(0,123 \cdot \frac{f_1}{f_{1H}}\right)^2}}; \quad (43)$$

$$\omega(s, f) = \omega_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1H}} \cdot (1 - s). \quad (44)$$

По результатам расчета на рисунке 6 построены естественные электромеханические характеристики $\omega(I_1)$, $\omega(I_2')$ при $f_1 = f_{1H} = 50$ Гц.

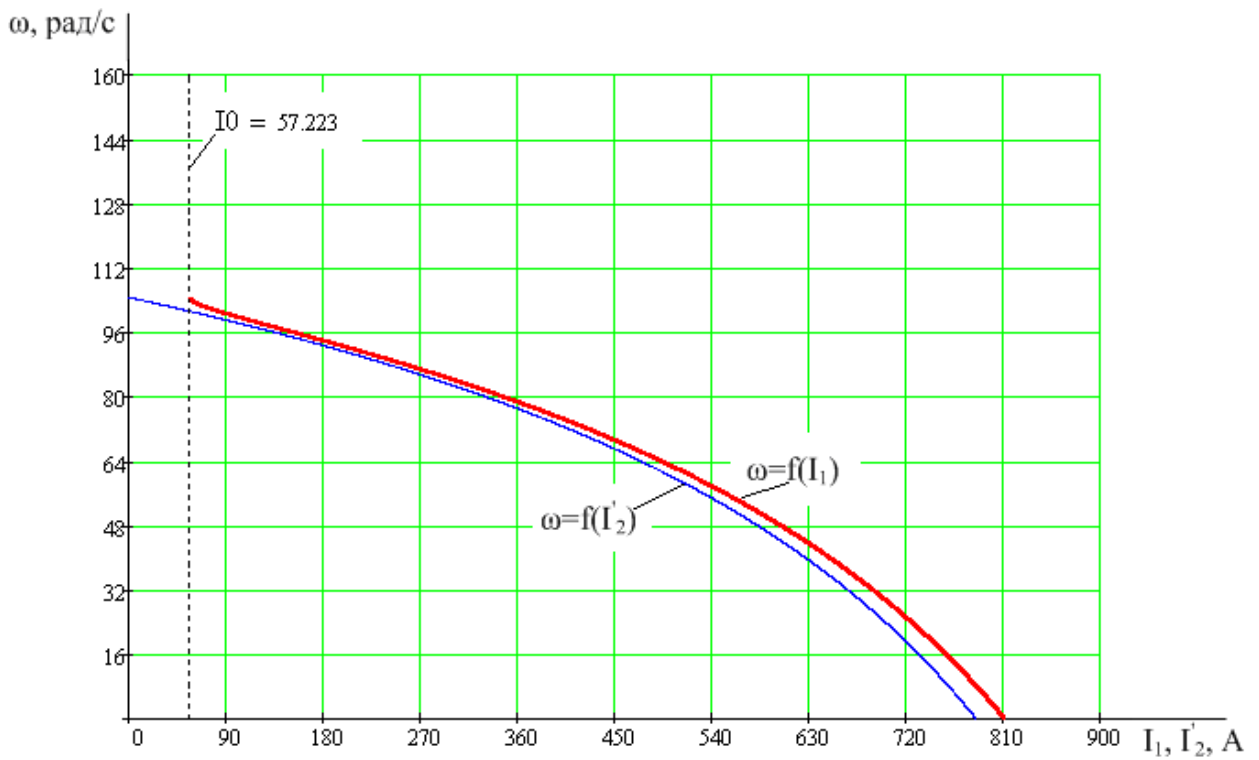


Рисунок 6 – Естественные электромеханические характеристики АД

$$\omega(I_1), \omega(I_2')$$

По результатам расчета электромеханической характеристики $\omega(I_1)$ найдены значения тока холостого хода (намагничивания) $I_0 = 57,223$ А, номинального тока $I_H = 118,090$ А и пускового тока двигателя $I_{\Pi} = 812,188$ А.

По полученным результатам определяем кратность пускового тока

$$k_i = \frac{I_{\Pi}}{I_H} = \frac{812,188}{118,09} = 6,878. \quad (45)$$

Параметры расчетных механической и электромеханической характеристик двигателя оказались близки к приведённым в таблице 1 справочным параметрам двигателя.

3.1.4 Механическая система электропривода подъема

Расчетная схема механической системы электропривода подъема представляет собой, согласно [6], двухмассовую систему, представленную на рисунке 7, где приняты следующие обозначения:

J_1 – момент инерции двигателя и механизма;

J_2 – момент инерции поднимаемых масс;

$M_{\text{эм}}$ – электромагнитный момент двигателя;

M_c – момент сопротивления типа сухого трения на валу первой массы;

$M_{\text{с.нагр.}}$ – момент нагрузки, развиваемый грузом, активный по характеру;

c_{12} – эквивалентная угловая жесткость;

b_{12} – эквивалентный коэффициент внутреннего демпфирования.

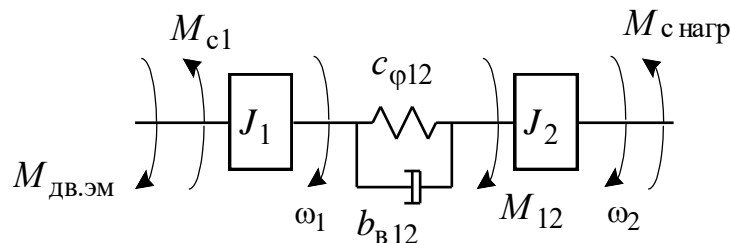


Рисунок 7 – Расчетная схема механической системы привода подъема

3.1.5 Параметры элементов механической системы привода

Момент инерции на валу первой массы

$$J_1 = J_{\text{дв}} + J_{\text{мех}} = J_{\text{дв}} + J_{\text{т}} + J_{\text{пер}} = 1,02 + 0,153 + 0,102 = 1,275 \text{ кг} \cdot \text{м}^2; \quad (46)$$

где

$J_{\text{дв}} = 1,02 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ – момент инерции двигателя;

$J_{\text{т}} = 0,15 \cdot 1,02 = 0,153 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ – момент инерции тормоза;

$J_{\text{пер}} = 0,1 \cdot 1,102 = 0,102 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ – момент инерции передачи.

Момент инерции на валу второй массы при подъеме пустого грузозахватного устройства

$$J_{2\text{мин}} = J_{\text{м1}} + J_{\text{кан}} = 0,01218 + 0,00104 = 0,01322 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad (47)$$

где

$$J_{m1} = m_y \cdot \left(\frac{D_6}{2} \right)^2 \cdot \frac{1}{i_{ред}^2 \cdot i_{пол}^2} = 6350 \cdot \left(\frac{0,59}{2} \right)^2 \cdot \frac{1}{71^2 \cdot 3^2} = 0,01218 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \text{ – момент}$$

инерции грузозахватного устройства;

$$J_{кан} = m_{кан} \cdot \left(\frac{D_6}{2} \right)^2 \cdot \frac{1}{i_{ред}^2 \cdot i_{пол}^2} = 539,489 \cdot \left(\frac{0,59}{2} \right)^2 \cdot \frac{1}{71^2 \cdot 3^2} = 0,00104 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 \text{ –}$$

момент инерции каната;

$$m_{кан} = 2 \cdot \rho_{ст} \cdot s_{кан} \cdot l_{кан} = 2 \cdot 7,8 \cdot 10^3 \cdot 4,021 \cdot 10^{-4} \cdot 86 = 539,489 \text{ кг} \text{ – масса каната;}$$

$$\rho_{ст} = (7,7 - 7,9) \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2} \text{ – удельный вес стали, принимаем } \rho_{ст} = 7,8 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2};$$

$$s_{кан} = \pi \cdot \left(\frac{d_{кан}}{2} \right)^2 \cdot k_{зап} = \pi \cdot \left(\frac{32 \cdot 10^{-3}}{2} \right)^2 \cdot 0,5 = 4,021 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 \text{ – площадь сече-}$$

ния проволок.

Момент инерции на валу второй массы при подъеме максимального груза

$$J_{2\text{макс}} = J_{m2} + J_{кан} = 0,07932 + 0,00104 = 0,08035 \text{ кг} \cdot \text{м}^2, \quad (48)$$

где

$$J_{m2} = (m_y + m_{гр}) \cdot \left(\frac{D_6}{2} \right)^2 \cdot \frac{1}{i_{ред}^2 \cdot i_{пол}^2} = (35000 + 6350) \cdot \left(\frac{0,59}{2} \right)^2 \cdot \frac{1}{71^2 \cdot 3^2} = 0,07932 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$$

– момент инерции поднимаемых масс при подъеме максимального груза.

Линейная жесткость подъемного каната (в нижнем положении)

$$c_l = a_{пол} \cdot i_{пол} \cdot \frac{c_{кан}}{l_{кан}} = 2 \cdot 3 \cdot \frac{5,027 \cdot 10^7}{86} = 3,507 \cdot 10^6 \frac{\text{Н}}{\text{м}}, \quad (49)$$

где $c_{кан} = E_{кан} \cdot s_{кан} = 1,25 \cdot 10^{11} \cdot 4,021 \cdot 10^{-4} = 5,027 \cdot 10^7 \text{ Н}$ – жесткость одного погонного метра каната;

$E_{кан} = (1,1 - 1,4) \cdot 10^{11}$ – модуль упругости для стального каната, принимаем $E_{кан} = 1,25 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$.

Приведенная угловая жесткость (в нижнем положении)

$$c_{12} = c_l \cdot \left(\frac{D_6}{2} \right)^2 \cdot \frac{1}{i_{ред}^2} \cdot \frac{1}{i_{пол}^2} = 3,507 \cdot 10^6 \cdot \left(\frac{0,59}{2} \right)^2 \cdot \frac{1}{71^2} \cdot \frac{1}{3^2} = 6,727 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{рад}}. \quad (50)$$

Минимальное значение угловой частоты резонансных колебаний
ДМС

$$\omega_{12} = \sqrt{c_{12} \cdot \frac{J_1 + J_{2\text{макс}}}{J_1 \cdot J_{2\text{макс}}}} = \sqrt{6,727 \cdot \frac{1,275 + 0,08035}{1,275 \cdot 0,08035}} = 9,434 \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (51)$$

Коэффициент внутреннего демпфирования (в нижнем положении)

$$b_{в12} = \frac{\lambda_{в} \cdot c_{12}}{\pi \cdot \omega_{12}} = \frac{(0,1 \div 0,2) \cdot 6,727}{\pi \cdot 9,434} = 0,023 \div 0,045. \quad (52)$$

Принимаем $b_{в12} = 0,03$

Структурная схема двухмассовой механической системы электропривода механизма подъема приведена на рисунке 8.

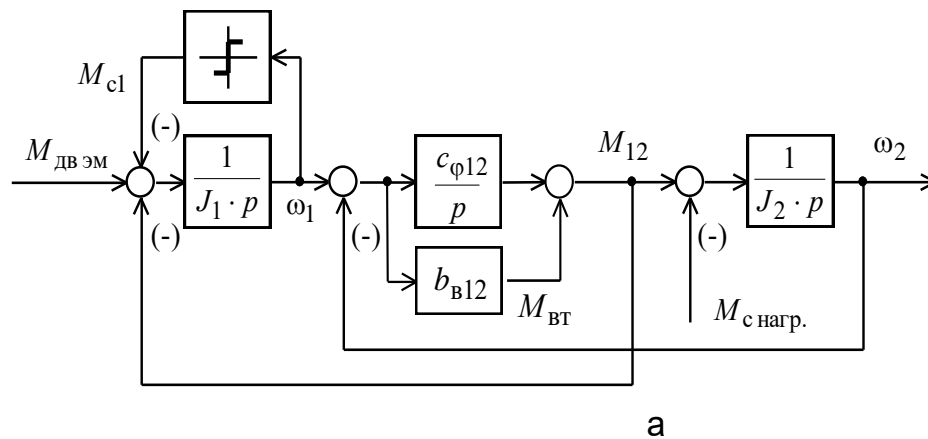


Рисунок 8 – Структурная схема двухмассовой механической системы электропривода механизма подъема

3.1.6 Определение заданной области работы

Момент сопротивления на валу двигателя

$$M_{с.дв.} = M_{эм} - M_{дв.н.} = 593,198 - 558,777 = 34,422 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (53)$$

КПД передачи в номинальном режиме [3]

$$\eta_{пер.н.} = \eta_{кан} \cdot \eta_{укл} \cdot \eta_{ред} = 0,98 \cdot 0,98 \cdot 0,84 = 0,81, \quad (54)$$

где $\eta_{кан} = 0,98$ – КПД блока канатной передачи;

$\eta_{\text{укл}} = 0,98$ – КПД канатоукладчика;

$\eta_{\text{ред}} = 0,84$ – КПД трехступенчатого редуктора.

Коэффициенты постоянных и переменных потерь

$$a = b = \frac{1 - \eta_{\text{пер.н.}}}{2 \cdot \eta_{\text{пер.н.}}} = \frac{1 - 0,81}{2 \cdot 0,81} = 0,11728. \quad (55)$$

Приведенный к валу двигателя момент, обусловленный грузом

– при максимальном грузе

$$M_{\text{гр.макс}} = \frac{(G_{\text{гр}} + G_y) \cdot D_6}{2 \cdot i_{\text{ред}} \cdot i_{\text{пол}}} = \frac{(343350 + 62293,5) \cdot 0,59}{2 \cdot 71 \cdot 3} = 561,8 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (56)$$

где $G_{\text{гр}} = m_{\text{гр}} \cdot g = 35000 \cdot 9,81 = 343350 \text{ Н}$ – вес груза максимальный;

$G_y = m_y \cdot g = 6350 \cdot 9,81 = 62293,5 \text{ Н}$ – вес грузозахватывающего устройства.

– при пустом крюке

$$M_{\text{гр.мин}} = \frac{G_y \cdot D_6}{2 \cdot i_{\text{ред}} \cdot i_{\text{пол}}} = \frac{62293,5 \cdot 0,59}{2 \cdot 71 \cdot 3} = 86,27 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (57)$$

Величина постоянных потерь в механизме

$$M_{\text{с.пост}} = a \cdot M_{\text{гр.макс}} = 0,11728 \cdot 561,8 = 65,89 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (58)$$

Момент трения на валу первой массы двухмассовой электромеханической системы при максимальном грузе

$$M_{\text{с}} = M_{\text{с.дв.}} + M_{\text{с.пост}} = 34,422 + 65,89 = 100,312 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (59)$$

Статические моменты

– при подъеме максимального груза

$$\begin{aligned} M_{\text{с1макс}} &= M_{\text{с.дв.}} + M_{\text{с.пост}} + (1 + b) \cdot M_{\text{гр.макс}} = \\ &= 34,422 + 65,89 + (1 + 0,11728) \cdot 561,8 = 728,01 \text{ Н} \cdot \text{м}; \end{aligned} \quad (60)$$

– при подъеме пустого грузозахватывающего устройства

$$\begin{aligned} M_{\text{с1мин}} &= M_{\text{с.дв.}} + M_{\text{с.пост}} + (1 + b) \cdot M_{\text{гр.мин}} = \\ &= 34,422 + 65,89 + (1 + 0,11728) \cdot 86,27 = 196,706 \text{ Н} \cdot \text{м}; \end{aligned} \quad (61)$$

– при спуске максимального груза

$$M_{с2\max} = -M_{с.дв.} - M_{с.пост} + (1 - b) \cdot M_{гр.\max} = \quad (62)$$

$$= -34,422 - 65,89 + (1 - 0,11728) \cdot 561,8 = 395,603 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

– при спуске пустого грузозахватывающего устройства

$$M_{с2\min} = -M_{с.дв.} - M_{с.пост} + (1 - b) \cdot M_{гр.\min} = \quad (63)$$

$$= -34,422 - 65,89 + (1 - 0,11728) \cdot 86,27 = -24,156 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

Заданная область работы приведена на рисунке 9.

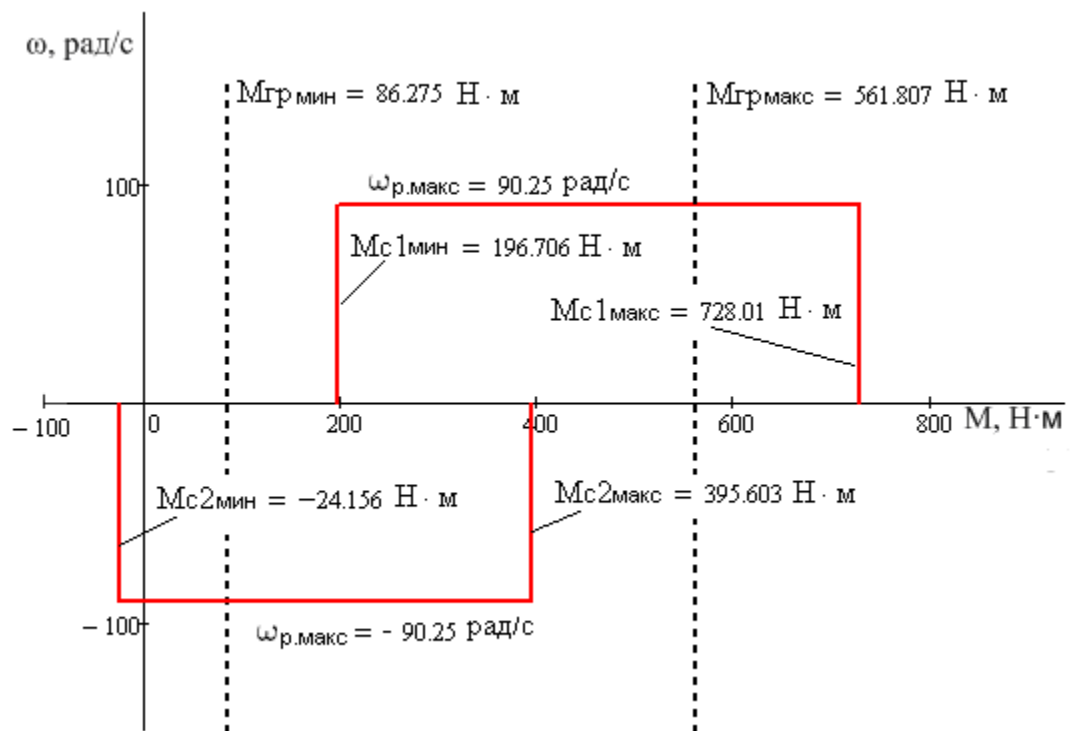


Рисунок 9 – Заданная область работы электропривода

3.2. Расчет предельных характеристик разомкнутой системы преобразователь частоты – асинхронный двигатель

3.2.1. Определение максимальной и минимальной частоты инвертора

Максимальную рабочую частоту инвертора, соответствующую максимальной рабочей скорости $\omega = \omega_{p.макс} = 90,254$ рад/с при максимальной нагрузке $M = M_{с1макс} = 728,01$ Н·м, определяем путем решения относительно частоты f_1 уравнение, согласно [7]:

$$M = \frac{3 \cdot \left[U_{1фн} \cdot \left(\frac{f_1}{f_{1н}} \right)^2 \right]^2 \cdot R'_2}{\left(\omega_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1н}} - \omega \right) \cdot \left[\left(X_{кн} \cdot \frac{f_1}{f_{1н}} \right)^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{\omega_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1н}} - \omega} \cdot \omega_0 \cdot \frac{f_1}{f_{1н}} \right)^2 \right]}; \quad (64)$$

Принимаем ближайшее целое значение частоты инвертора

$$f_{имакс} = 47 \text{ Гц.}$$

Минимальную рабочую частоту инвертора определяем из условия обеспечения заданного диапазона регулирования скорости $D=10$:

$$f_{имин} = \frac{f_{имакс}}{D} = \frac{47}{10} = 4,7 \text{ Гц.}$$

Принимаем $f_{имин} = 5$ Гц.

3.3 Расчет механических и электромеханических характеристик разомкнутой системы

Механическая характеристика $M = f(s, f_1)$ разомкнутой системы ПЧ-АД при частотном регулировании рассчитана по выражению (1) для значения выходной частоты инвертора $f_1 = f_{\text{имакс}} = 47$ Гц и приведена на рисунке 10.

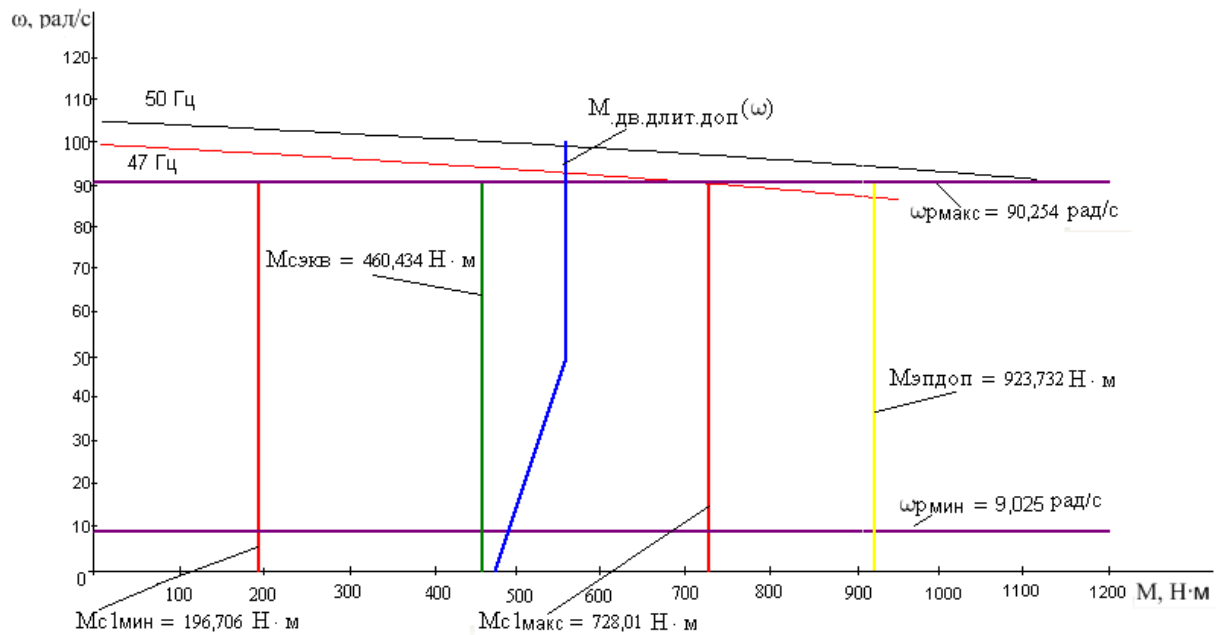


Рисунок 10 – Механические характеристики разомкнутой системы электропривода и нагрузки

Электромеханическая характеристика $I_1 = f(s, f_1)$ разомкнутой системы ПЧ-АД при частотном регулировании рассчитана по выражениям (2)–(5) для частоты $f_1 = f_{\text{имакс}} = 47$ Гц приведена на рисунке 11 в виде зависимости $\omega = f(I_1)$.

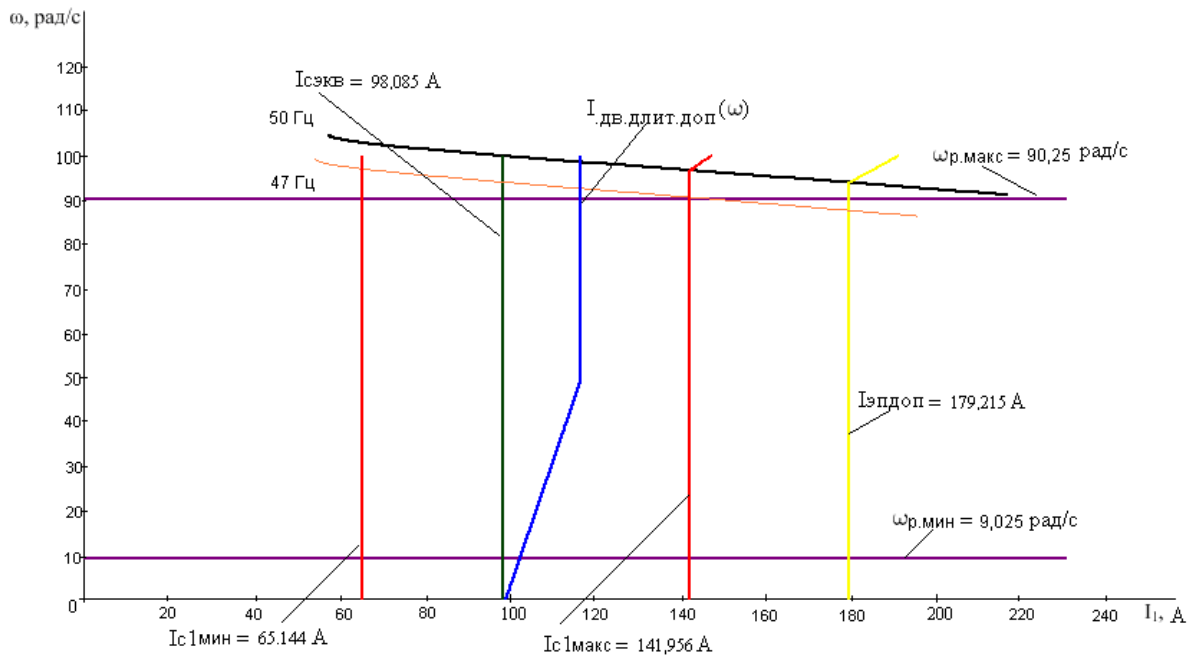


Рисунок 11 – Электромеханические характеристики разомкнутой системы электропривода и нагрузки

Проверка правильности выбора электродвигателя

Рассчитаны и построены в плоскости механических характеристик $\omega = f(M)$ (рисунок 10) следующие характеристики:

– характеристика максимального статического момента при подъеме максимального груза $M_{с1макс}(\omega) = \text{const} = 728,01 \text{ Н} \cdot \text{м}$;

– характеристика минимального статического момента при подъеме минимального груза $M_{с1мин}(\omega) = \text{const} = 196,71 \text{ Н} \cdot \text{м}$;

– характеристика эквивалентного статического момента

$$M_{с1экв}(\omega) = \text{const} = M_{с1макс} \cdot \sqrt{\text{ПВ}} = 728,01 \cdot \sqrt{0,4} = 460,434 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (65)$$

где ПВ=0,4 – продолжительность включения [3];

– характеристика максимального динамического момента электропривода, $M_{эп доп}(\omega) = \text{const}$, рассчитанная из условия ограничения ускорения на допустимом уровне:

$$M_{эп доп}(\omega) = \text{const} = M_{с1макс} + M_{дин доп} = 728,01 + 195,722 = 923,732 \text{ Н} \cdot \text{м}, \quad (66)$$

где $a_{доп} = 0,2 - 0,3 \frac{\text{м}}{\text{с}^2}$ – допустимое ускорение [3], принимаем $a_{доп} = 0,2 \text{ м/с}^2$;

$$M_{\text{дин доп}}(\omega) = J_{\text{э}} \cdot a_{\text{доп}} \cdot \frac{\omega_{\text{раб макс}}}{V_{\text{макс}}} = 1,355 \cdot 0,2 \cdot \frac{90,25 \cdot 60}{7,5} = 195,722 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

– характеристика длительно допустимого момента двигателя

$$M_{\text{дв.дл.доп}}(\omega):$$

$$M_{\text{дв.дл.доп}}(\omega) = M_{\text{дв.н}} \cdot \left(0,85 + \frac{0,15 \cdot \omega}{0,5 \cdot \omega_{\text{дв.н}}} \right), \text{ при } \omega \leq 0,5 \cdot \omega_{\text{дв.н}};$$

$$M_{\text{дв.дл.доп}}(\omega) = M_{\text{дв.н}}, \text{ при } 0,5 \cdot \omega_{\text{дв.н}} < \omega < \omega_{\text{дв.н}}.$$

Рассчитаны и построены в плоскости электромеханических характеристик $\omega = f(I_1)$ (рисунок 11) следующие характеристики:

– характеристика статического тока $I_{\text{с1макс}}(\omega) = \text{const} = 141,95 \text{ А}$, соответствующая статическому моменту при подъеме максимального груза, рассчитанная по выражениям (40)–(43) при $f_1 = f_{1\text{н}} = 50 \text{ Гц}$ для значения скольжения $s=0,7675$, определенного путем решения уравнения (67) при

$$M = M_{\text{с1макс}} = 728,01 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M = \frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2 \cdot R'_2}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[X_{\text{кн}}^2 + \left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R'_2}{s \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]}; \quad (67)$$

– характеристика статического тока $I_{\text{с1мин}}(\omega) = \text{const} = 42,9 \text{ А}$, соответствующая статическому моменту при подъеме минимального груза, рассчитанная по выражениям (40)–(43) при $f_1 = f_{1\text{н}} = 50 \text{ Гц}$ для значения скольжения $s=0,01731$, определенного путем решения уравнения (67) при

$$M = M_{\text{с1мин}} = 196,71 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

– характеристика эквивалентного статического тока

$I_{\text{сэкр}}(\omega) = \text{const} = 98,085 \text{ А}$, соответствующая эквивалентному статическому моменту, рассчитанная по выражениям (40) – (43) при $f_1 = f_{1\text{н}} = 50 \text{ Гц}$ для значения скольжения $s=0,04559$, определенного путем решения уравнения (67) при $M = M_{\text{с.экр}} = 460,434 \text{ Н} \cdot \text{м};$

– характеристика длительно допустимого тока двигателя

$I_{\text{дв.дл.доп}}(\omega)$:

$$I_{\text{дв.дл.доп}}(\omega) = I_{\text{дв.н}} \cdot \left(0,85 + \frac{0,15 \cdot \omega}{0,5 \cdot \omega_{\text{дв.н}}} \right), \text{ при } \omega \leq 0,5 \cdot \omega_{\text{дв.н}};$$

$$I_{\text{дв.дл.доп}}(\omega) = M_{\text{дв.н}}, \text{ при } 0,5 \cdot \omega_{\text{дв.н}} < \omega < \omega_{\text{дв.н}}.$$

– характеристика максимально допустимого тока электропривода

$I_{\text{эл.доп}}(\omega) = \text{const} = 179,215 \text{ А}$, соответствующая максимальному динамическому моменту, рассчитанная по выражениям (40)-(43) при $f_1 = f_{1\text{н}} = 50 \text{ Гц}$ для значения скольжения $s=0,10305$, определенного путем решения уравнения (67) при $M = M_{\text{эл.доп}} = 923,732 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Анализ, приведенных на рисунках 10 и 11, механических и электромеханических характеристик электропривода и нагрузки показывает, что

$$I_{\text{дв.дл.доп}}(\omega) > I_{\text{с экв}};$$

$$M_{\text{дв.дл.доп}}(\omega) > M_{\text{с экв}},$$

следовательно, при выбранном электродвигателе асинхронный частотно-регулируемый электропривод обеспечивает заданный диапазон регулирования скорости.

3.4 Выбор преобразователя частоты

Для кранового частотно-регулируемого электропривода требуются преобразователи частоты, специально адаптированные к применению в грузоподъемных кранах и обладающие необходимыми функциональными возможностями:

– функция управления тормозом предназначена для выдачи сигнала на открытие тормоза при достижении двигателем необходимого момента и сигнала на наложение тормоза при снижении скорости до минимального уровня. Для корректировки снятия тормоза может использоваться функция весоизмерения.

- функция подъема с повышенной скоростью. Максимальная скорость подъема определяется автоматически в зависимости от массы груза.
- функция ограничения момента электродвигателя с формированием желаемой механической характеристики в двигательном и генераторном режимах.
- функция формирования заданного темпа разгона и торможения.
- функция торможения электропривода с использованием тормозного резистора или блока рекуперации. Экономический эффект от внедрения модулей рекуперации увеличивается: с увеличением мощности электроприводов, при резких торможениях инерционных механизмов, а также при опускании груза на большую глубину (лифты, шахтные подъемники). Учитывая сложившееся мнение о низкой эффективности рекуперации для систем с током потребления до 100 А [1, 2], а также относительно высокую стоимость модулей рекуперации и сложность внедрения, принято решение использовать тормозной резистор.

3.5 Параметры преобразователя частоты

С учетом перечисленных выше требований выбираем преобразователь частоты *Altivar 71 HD75N4*, предназначенный для кранового электропривода.

Параметры преобразователя частоты сведены в таблицу 7.

Таблица 7 - Параметры преобразователя частоты

Тип	Параметры питающей сети		Выходная частота	Выходной ток	
	$U_{лн}$, В	f_c , Гц	$f_{и}$, Гц	$I_{ин}$, А	$I_{ин макс}$, А (60 с)
<i>Altivar 71 HD75N4</i>	380-480	50/60	0-120	160	240

Общие технические данные преобразователя частоты серии *Altivar 71 HD75N4*:

- питающая сеть: (380–480) В \pm 10%; (50–60) Гц \pm 5%, 3 фазы;

- диапазон регулирования скорости;
- разомкнутая система, векторное управление $s_H \div 100\%$;
- замкнутая система, векторное управление $0 \div 100\%$;
- максимальная погрешность поддержания частоты вращения (разомкнутая система) $0,01 \cdot \omega_H$ в диапазоне скоростей $0,1 \cdot \omega_H < \omega \leq \omega_H$ и $1/3 \cdot s_H$ в диапазоне скоростей $0,1 \cdot \omega_H < \omega \leq \omega_H$;
- тепловая защита преобразователя частоты осуществляется с помощью термосопротивления, установленного на радиаторе или встроенного в силовой модуль (рисунок 12);

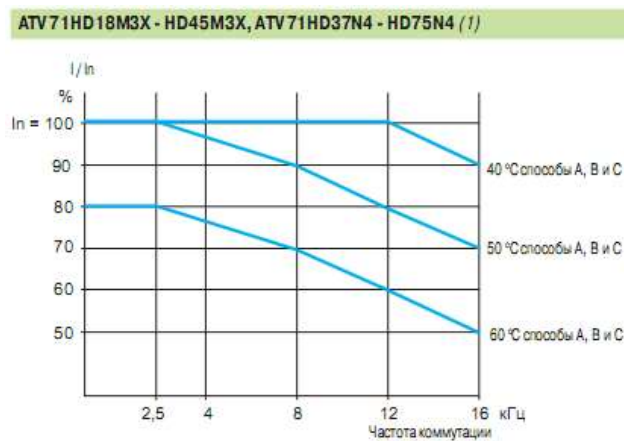


Рисунок 12 – Зависимость тока преобразователя I_{II} от температуры, частоты коммутации и способа установки

– схема подключения (рисунок 13);

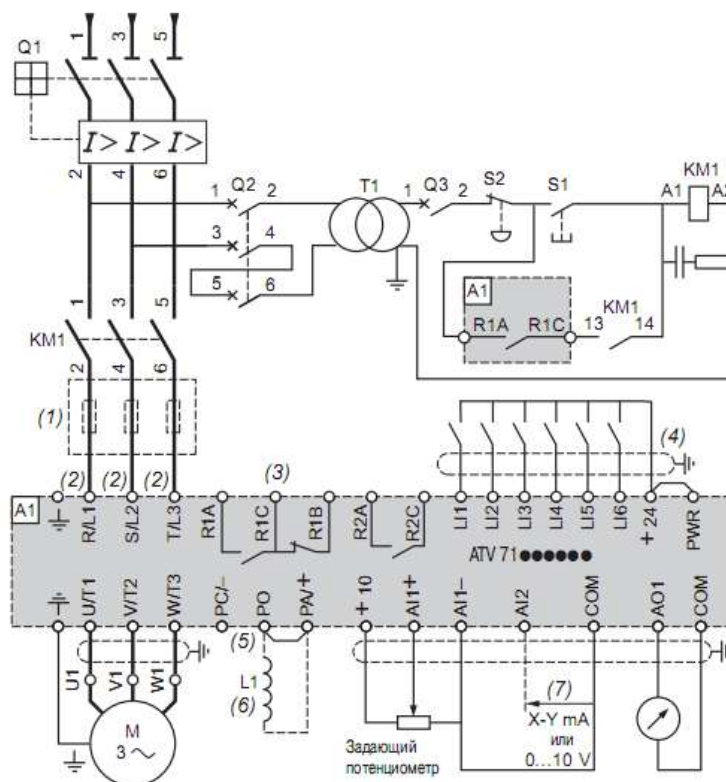


Рисунок 13 – Трехфазное питание с отключением на входе с помощью сетевого контактора

Комплектующие таблица 8

Код	Наименование
A1	Преобразователь ATV71 HD75N4
KM1	Сетевой контактор LC1 F185**
L1	Дроссель постоянного тока $L=0,22$ мГн, $I_H=171,2$ А, $P_{потери}=128$ Вт
Q1	Выключатель NS250*MA220
Q2	GV2 с током, который в 2 раза больше I_H первичной обмотки T1
Q3	GB2 CB05
S1,S2	Кнопки XB4 В или XB5 А
T1	Трансформатор 100ВА со вторичной обмоткой на 220 В

3.6 Проверка правильности выбора преобразователя

На рисунке 12 в плоскости электромеханических характеристик построены характеристики нагрузки и характеристики преобразователя частоты

$$I_{ин}(\omega) = \text{const} = 160 \text{ A},$$

$$I_{имакс}(\omega) = \text{const} = 240 \text{ A}.$$

Условия проверки правильности выбора преобразователя частоты

$$I_{с экв}(\omega) < I_{ин};$$

$$I_{с1 макс}(\omega) < I_{имакс}; \quad (68)$$

$$I_{эп доп}(\omega) < I_{имакс}.$$

Анализ приведенных на рисунке 12 электромеханических характеристик разомкнутой системы электропривода, характеристик преобразователя частоты и нагрузки показывает, что все три условия выполняются, следовательно, преобразователь выбран правильно.

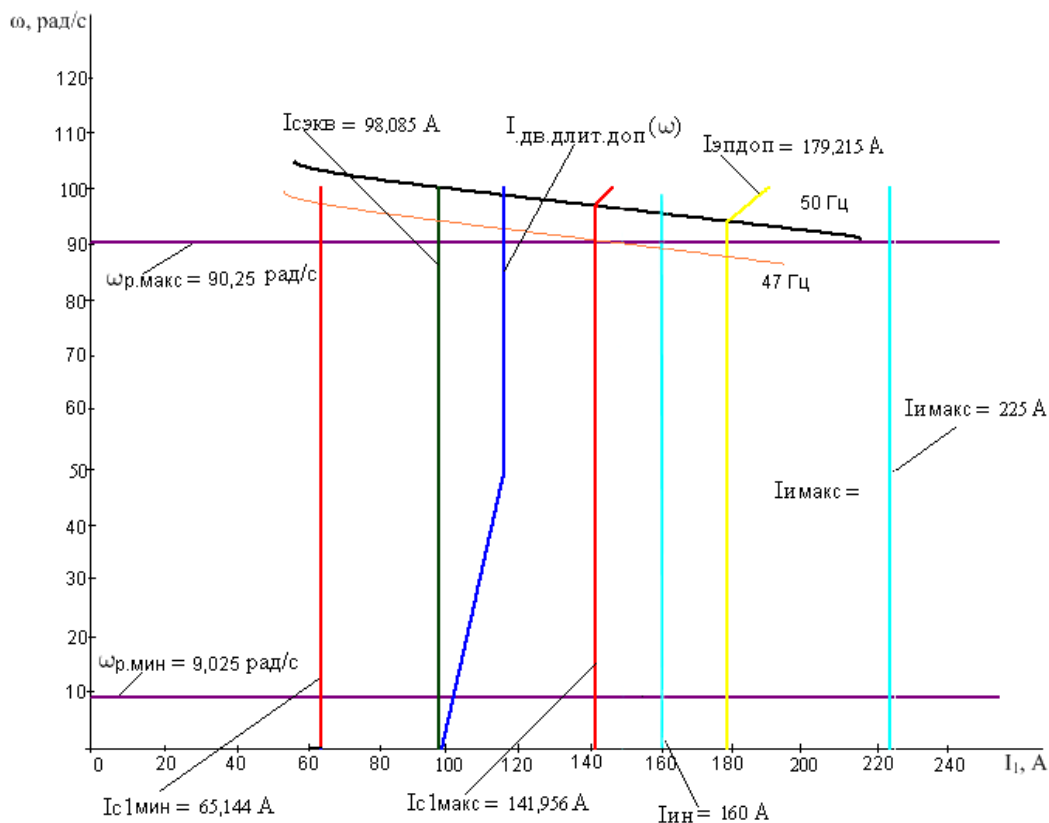


Рисунок 12 – Электромеханические характеристики разомкнутой системы электропривода, преобразователя и нагрузки

3.7 Проверка обеспечения заданной области работы

Определим максимальную рабочую частоту инвертора из условия обеспечения максимального момента электропривода при подъеме на максимальной рабочей скорости. Решив относительно частоты f_1 уравнение (44) при $\omega = \omega_{p.макс} = 90,254$ рад/с и $M = M_{эп.доп}$, окончательно принимаем значение максимальной частоты инвертора $f_{и.макс} = 49$ Гц.

На рисунке 13 приведены предельные механические характеристики $\omega = f(M)$ разомкнутой системы электропривода при частотном регулировании для значений частоты $f_1 = 47, 49, 50$ Гц и характеристики нагрузки

- характеристики статического момента при подъеме
– максимального груза

$$M_{с1макс}(\omega) = \text{const} = 728,01 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

- пустого грузозахватывающего устройства

$$M_{с1мин}(\omega) = \text{const} = 196,71 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

- характеристики статического момента при спуске
– максимального груза

$$M_{с2макс}(\omega) = \text{const} = 395,60 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

- пустого грузозахватывающего устройства

$$M_{с2мин}(\omega) = \text{const} = -24,16 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

- – характеристика максимального момента

$$M_{эп.доп}(\omega) = \text{const} = 923,73 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Приведенные на рисунке 13 характеристики доказывают, что при выбранных условиях электропривод с частотным регулированием обеспечивает заданную область работы.

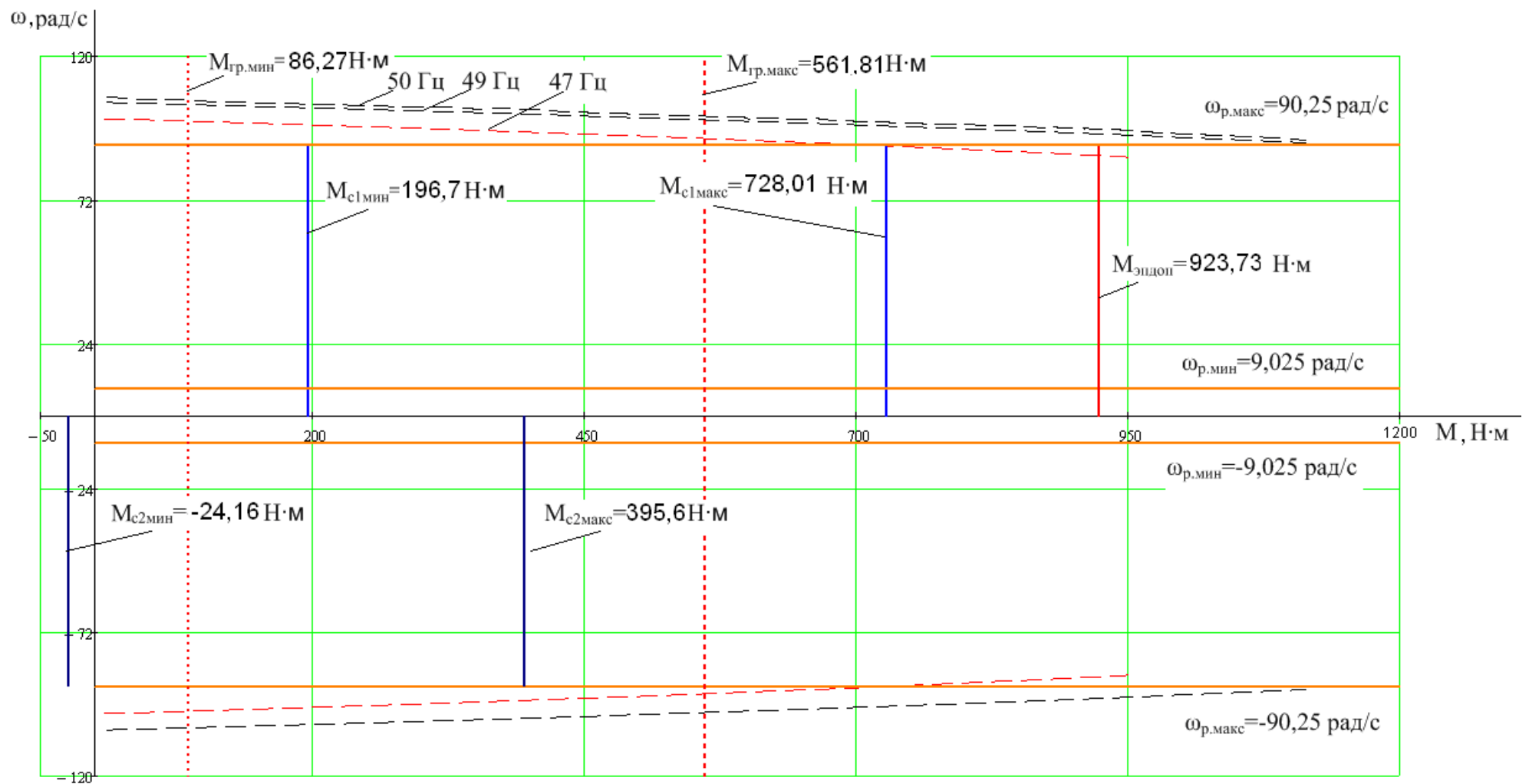


Рисунок 13 – Механические характеристики разомкнутой системы электропривода при частотном регулировании и характеристики нагрузки

3.8 Структурная схема силового канала электропривода

Структурная схема силового канала непрерывной линейаризованной системы ПЧ–АД во вращающейся системе координат, ориентированной по результирующему вектору потокосцепления ротора, при компенсации внутренних ЭДС двигателя приведена на рисунке 14. Управляющими сигналами на входе преобразователя структурной схемы силового канала являются напряжения постоянного тока. Выходные напряжения преобразователя представляют собой составляющие напряжения статора U_{1d} и U_{1q} в ортогональной системе координат d, q , ориентированной по результирующему вектору потокосцепления ротора Ψ_{2d} .

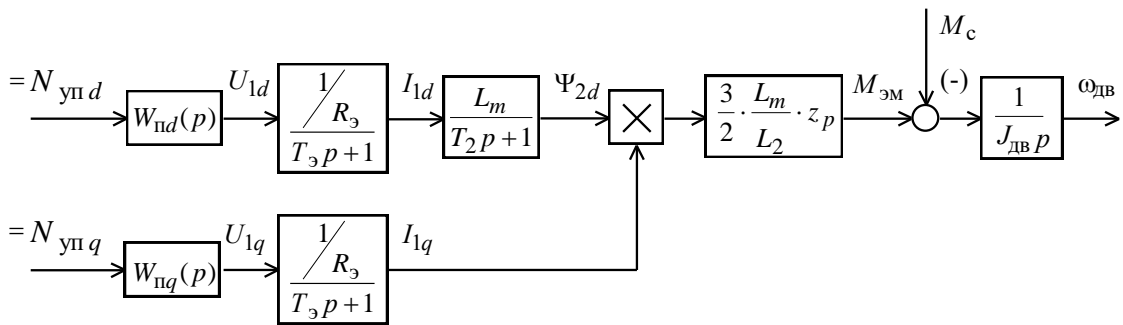


Рисунок 14 – Структурная схема силового канала системы ПЧ–АД во вращающейся двухфазной системе координат, ориентированной по результирующему вектору потокосцепления ротора, при компенсации внутренних перекрестных обратных связей

Расчет параметров элементов структурной схемы силового канала электропривода

Расчет параметров преобразователя

Максимальное значение коэффициента усиления преобразователя

$$k_{и} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{1фн}}{N_{уп макс}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 220}{1} = 311,13, \quad (69)$$

где $N_{\text{уп макс}}$ – максимальное значение напряжения управления, В, принимаем $N_{\text{уп макс}} = 1$.

Эквивалентная постоянная времени преобразователя

$$\dot{\theta}_{\text{ø èi}} = \frac{1}{f_{\text{ø èi}}} = \frac{1}{10000} = 1 \cdot 10^{-4} \text{ с}, \quad (70)$$

где $f_{\text{шим}}$ – несущая частота инвертора, Гц. Принимаем $f_{\text{ø èi}} = 10 \text{ кГц}$.

Расчет параметров двигателя

Эквивалентные индуктивности обмоток

– статора

$$L_1 = L_{\sigma 1} + L_{\mu} = 0,164 \cdot 10^{-3} + 0,01207 = 0,01223 \text{ Гн}; \quad (71)$$

– ротора

$$L_2 = L'_{\sigma 2} + L_{\mu} = 0,2192 \cdot 10^{-3} + 0,01207 = 0,01229 \text{ Гн}. \quad (72)$$

Коэффициент рассеяния

$$\sigma = 1 - \frac{L_{\mu}^2}{L_1 \cdot L_2} = \frac{0,01207^2}{0,01223 \cdot 0,01229} = 0,031. \quad (73)$$

Эквивалентное сопротивление

$$R_{\text{э}} = R_1 + R_2' \cdot \frac{L_{\mu}^2}{L_2^2} = 0,128 + 0,124 \cdot \frac{0,01207^2}{0,01229^2} = 0,247 \text{ Ом}. \quad (74)$$

Электромагнитные постоянные времени

$$T_{\text{э}} = \frac{\sigma \cdot L_1}{R_{\text{э}}} = \frac{0,031 \cdot 0,01223}{0,247} = 1,5327 \cdot 10^{-3} \text{ с}; \quad (75)$$

$$T_2 = \frac{L_2}{R_2'} = \frac{0,01229}{0,124} = 0,0992 \text{ с}. \quad (76)$$

3.9 Определение максимального момента при подъеме и спуске в системе векторного управления, максимального ускорения и максимального усилия в канате

Номинальный поток двигателя

$$\psi_{2H} = \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot L_\mu = \sqrt{2} \cdot 53,911 \cdot 0,01207 = 0,92 \text{ Вб}. \quad (77)$$

Максимальный момент электропривода, определяемый максимальным током инвертора $I_{\text{имакс}}$, в системе векторного управления, согласно [10]

$$\begin{aligned} M_{\text{дв}} &= \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_{\text{имакс}}^2 - I_0^2} \cdot \psi_{2f} \cdot \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \frac{L_\mu}{L_2} = \\ &= \sqrt{2} \cdot \sqrt{225^2 - 53,911^2} \cdot 0,92 \cdot \frac{3}{2} \cdot 3 \cdot \frac{0,01207}{0,01229} = 1256,982 \text{ Н} \cdot \text{м}. \end{aligned} \quad (78)$$

Динамический момент электропривода в системе векторного управления

– при подъеме максимального груза

$$\dot{M}_{\text{дв}} = M_{\text{дв}} - M_{\text{нл}} = 1256,982 - 728,01 = 528,972 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (79)$$

– при подъеме минимального груза

$$\dot{M}_{\text{дв}} = M_{\text{дв}} - M_{\text{нл}} = 1256,982 - 196,71 = 1060,272 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (80)$$

Требуемый максимальный момент электропривода в системе векторного управления при пуске из условия обеспечения равенства динамических моментов при подъеме и спуске

$$\dot{M}_{\text{дв}} = M_{\text{дв}} + M_{\text{нл}} = 528,972 + 395,603 = 924,575 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (81)$$

Максимально допустимое значение тока в системе векторного управления при спуске

$$I'_{\text{дв}} = \frac{M_{\text{дв}}}{\psi_{2f} \cdot \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \frac{L_\mu}{L_2}} = \frac{924,575}{0,92 \cdot \frac{3}{2} \cdot 3 \cdot \frac{0,01207}{0,01229}} = 227,38 \text{ А}. \quad (82)$$

Максимально допустимое значение тока при постоянном токоограничении $I_{\text{эпмакс}} = \text{const}$

$$I_{\text{q.i. à è n}} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_{\text{v.i. à è n}}^2 - I_0^2} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{225^2 - 53,911^2} = 308,929 \text{ Å}. \quad (83)$$

Ускорение при подъеме максимального груза

$$\left(\frac{d\omega}{dt}\right)_{i \rightarrow n} = \frac{M_{\text{äëí.â}}}{J_{\text{ý}}} = \frac{528,972}{1,355} = 390,285 \frac{\text{äâ}}{\text{ñ}};$$

$$\dot{a}_{i \rightarrow n} = \left(\frac{d\omega}{dt}\right)_{i \rightarrow n} \cdot \frac{V_{i \rightarrow n}}{\omega_{i \rightarrow n}} = 390,283 \cdot \frac{7,5}{90,25 \cdot 60} = 0,541 \frac{1}{\text{ñ}^2}. \quad (84)$$

Время разгона при подъеме максимального груза

$$t_p = \frac{V_{i \rightarrow n}}{\dot{a}_{i \rightarrow n}} = \frac{7,5}{60 \cdot 0,541} = 0,231 \text{ c.} \quad (85)$$

Максимальное усилие в канате

$$F_{\hat{e}} = \frac{F_{\acute{a}}}{a_{\hat{i}\hat{e}}} = \frac{M_{\acute{a}}}{\left(\frac{D_{\acute{a}}}{2}\right) \cdot a_{\hat{i}\hat{e}}} = \frac{M_{\hat{y}\hat{i}\hat{a}\hat{i}\hat{a}\hat{e}\hat{n}\hat{l}} \cdot i_{\hat{o}\hat{a}\hat{a}}}{\left(\frac{D_{\acute{a}}}{2}\right) \cdot a_{\hat{i}\hat{e}}} = \frac{1256,982 \cdot 71}{\left(\frac{0,59}{2}\right) \cdot 2} = 151,264 \cdot 10^3 \text{ H}, \quad (86)$$

т.е. при выбранном максимальном ускорении $a_{\text{макс}} = 0,683 \text{ м/с}^2$ максимальное усилие в канате не превышает значения разрывного усилия (смотри таблицу 1):

$$F_{\text{к}} < F_{\text{кмакс}} \cdot$$

4. ОПТИМИЗАЦИЯ САУ ЭЛЕКТРОПРИВОДА МЕХАНИЗМА ПОДЪЕМА

4.1 Структурная схема линейризованной САУ РЭП

Структурная схема линейризованной непрерывной САУ частотно-регулируемого электропривода с векторным управлением приведена на рисунке 15.

На схеме приняты следующие обозначения:

$W(p)_{pT}, W(p)_{p\Psi}, W(p)_{pC}$ – передаточные функции регуляторов тока, потокосцепления и скорости;

k_T – коэффициент обратной связи по току, В/А;

k_Ψ – коэффициент обратной связи по потокосцеплению ротора, В/Вб;

k_C – коэффициент обратной связи по скорости, В·с/рад.

Расчет параметров преобразователя и системы управления инвертором

Условия согласования напряжений и токов преобразователя и двигателя:

$$U_{di} \geq \frac{1,35 \cdot \sqrt{3} \cdot U_{1f}}{k_{\tilde{m} \tilde{f}} \cdot \gamma_{i \hat{e} \tilde{n}}} = \frac{1,35 \cdot \sqrt{3} \cdot 220}{0,85 \cdot 0,95} = 637,052 \text{ В}$$

$$(k_{\tilde{m} \tilde{f}} = 0,85 \quad \gamma_{i \hat{e} \tilde{n}} = 0,95 \quad \text{данные из табл. 1})$$

Коэффициент усиления инвертора

$$k_e = \frac{U_{di}}{\sqrt{3}} = \frac{637,052}{\sqrt{3}} = 367,8$$

Коэффициент передачи датчика линейного тока

$$k_{\hat{i} \hat{d}} = \frac{0,5 \cdot 2^n}{\sigma_{\hat{d}} \cdot (\sqrt{2} \cdot I_{e \cdot i \hat{e} \tilde{n}})} = \frac{2048}{1,2 \cdot \sqrt{2} \cdot 225} = 5,364$$

Коэффициент согласования сигналов обратной связи и задания на входе тока

$$k_{i \tilde{n} \hat{d}} = \frac{1}{0,5 \cdot 2^n} = \frac{1}{2048} = 4,883 \cdot 10^{-4}$$

Коэффициент обратной связи по амплитудному значению фазного тока

$$k_{\delta} = k_{\ddot{u}\delta} \cdot k_{i\tilde{n},\delta} = 5,364 \cdot 4,883 \cdot 10^{-4} = 2,619 \cdot 10^{-3}$$

Оценим адекватность параметров модели и справочных и полученных расчетных параметров электродвигателя. Параметры двигателя, соответствующие справочным данным: $I_{двн} = I_{1фн} = 116,386 \text{ А}$; $M_{двн} = 558,777 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

Параметры двигателя расчетные: $I_0 = 53,911 \text{ А}$; $I_1(s_n) = 93,298 \text{ А}$;

$M_{эмн} = 593,421 \text{ Н} \cdot \text{м}$ и $\Psi_{2н} = 0,92 \text{ Вб}$. За основные параметры электродвигателя примем значения номинального тока $I_{1фн} = 116,386 \text{ А}$ и номинального электромагнитного момента $M_{эмн} = 593,421 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Решив совместно систему уравнений:

$$\begin{cases} \Psi_{2н} = \frac{M_{эмн}}{\frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \left(\frac{L_m}{L_2}\right) \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_{1фн}^2 - I_0^2}}, \\ \Psi_{2н} = \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot L_m \end{cases} \quad (90)$$

$$\begin{cases} 0,92 = \frac{593,421}{\frac{3}{2} \cdot 3 \cdot \left(\frac{0,01207}{0,01229}\right) \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{116,386^2 - 53,911^2}}, \\ 0,92 = \sqrt{2} \cdot 53,911 \cdot 0,01207 \end{cases} \quad (91)$$

Относительно тока I_0 определяем значение тока намагничивания

$I_0^* = 53,946 \text{ А}$, соответствующее параметрам структурной схемы.

Рассчитываем параметры структурной схемы, необходимые для оптимизации контуров регулирования:

– значение номинального потокосцепления двигателя, Вб

$$\Psi_{2дн}^* = \Psi_{2н}^* = \sqrt{2} \cdot I_0^* \cdot L_m = \sqrt{2} \cdot 53,946 \cdot 0,01207 = 0,921 \text{ Вб}; \quad (92)$$

– значение номинального тока $I_{1д}$, А

$$I_{1dн}^* = \sqrt{2} \cdot I_0^* = \sqrt{2} \cdot 53,946 = 76,291 \text{ A}; \quad (93)$$

– значение номинального тока I_{1q} , А

$$I_{1qн}^* = \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_{1фн}^2 - (I_0^*)^2} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{116,38^2 - 53,95^2} = 145,845 \text{ A}; \quad (94)$$

– максимально допустимое значение тока I_{1q} , А

$$I_{1q\text{ и } \hat{a}\hat{e}\hat{n}}^* = \sqrt{2} \cdot \sqrt{(I_{\hat{y}\hat{i}\hat{a}\hat{i}\hat{i}}^*)^2 - (I_0^*)^2} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{225^2 - 53,95^2} = 308.916 \text{ A}, \quad (95)$$

где $I_{\text{эп доп}}^* = I_{\text{эп доп}}$, если ограничен ток электропривода.

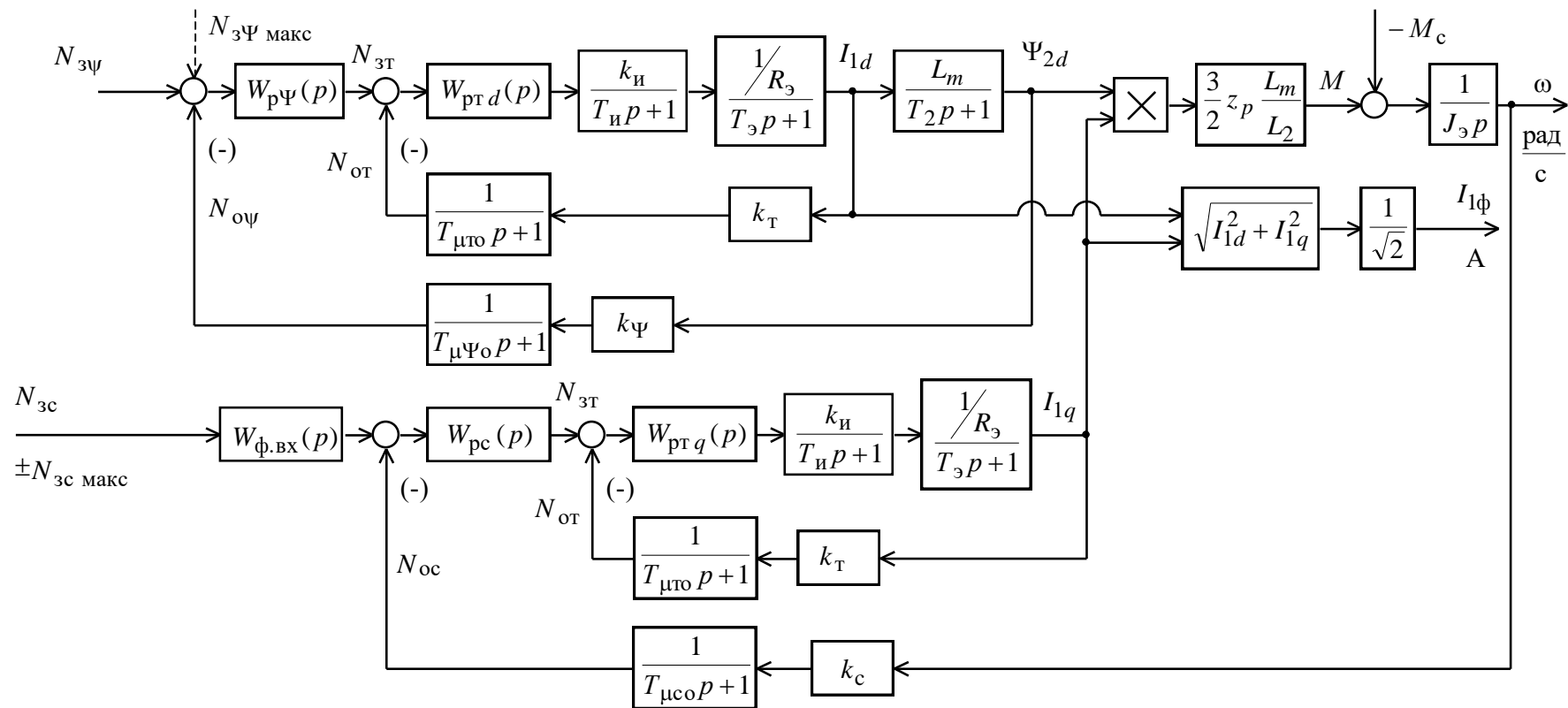


Рисунок 15 – Структурная схема линейризованной непрерывной САУ частотно-регулируемого асинхронного электропривода при векторном регулировании скорости

4.2 Оптимизация контура тока

4.2.1 Структурная схема и параметры элементов контура

Структурная схема контура тока с инерционной обратной связью и полной компенсацией перекрестных обратных связей двигателя приведена на рисунке 16.

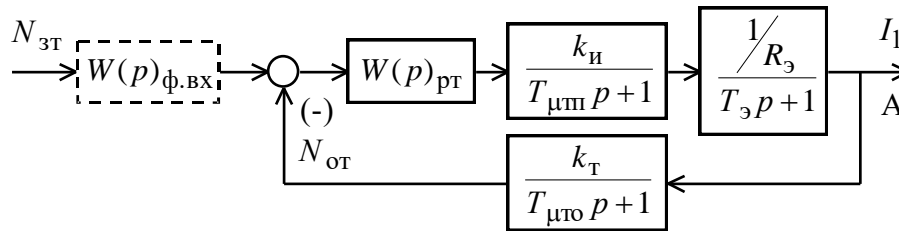


Рисунок 16 – Структурная схема контура тока

Контур токов I_{1d} и I_{1q} идентичные. Контур тока характеризуется одной большой постоянной времени в прямом канале $T_э = 0,0015327$ с.

В качестве регулятора тока принимаем ПИ–регулятор с передаточной функцией:

$$W_{рт}(p) = k_{рт} \cdot \frac{T_{рт} \cdot p + 1}{T_{рт} \cdot p} \quad (96)$$

и настраиваем контур тока на модульный оптимум (МО).

$$k_{\delta\delta} = \frac{\dot{O}_{\dot{y}} \cdot R_{\dot{y}}}{k_{\epsilon} \cdot k_{\delta} \cdot a_{\delta} \cdot \dot{O}_{\mu\delta\dot{y}}} = \frac{0,0015327 \cdot 0,247}{367,8 \cdot 0,002455 \cdot 2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-4}} = 1,398 \text{ – коэффициент}$$

усиления регулятора тока,

$$\text{где } \dot{O}_{\mu\delta\dot{y}} = \frac{\dot{O}_{\delta\delta\dot{r}}}{n_{\delta}} + \dot{O}_{\delta\delta\dot{r}} = 0,5 \cdot 10^{-4} + 10^{-4} = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ с – эквивалентная малая по-}$$

стоянная времени оптимизированного контура тока;

4.3 Оптимизация контура потокосцепления

4.3.1 Структурная схема и параметры элементов контура

При оптимизации контура потокосцепления внутренний оптимизированный замкнутый контур тока представлен усеченной передаточной функцией 1-го порядка

$$W(p)_{\text{Т зам}} \approx \frac{1}{T_{\text{Т}} \cdot p + 1}, \quad (106)$$

где $\dot{O}_{\delta} = \dot{a}_{\delta} \cdot \dot{O}_{\mu \delta y} = 2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-4} = 3 \cdot 10^{-4}$ с – эквивалентная постоянная времени оптимизированного контура потокосцепления.

Структурная схема контура потокосцепления приведена на рисунке 19.

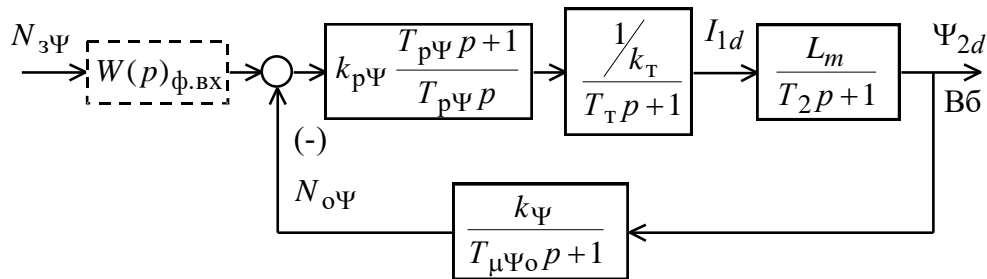


Рисунок 19 – Структурная схема контура потокосцепления

Контур потокосцепления характеризуется одной большой постоянной времени в прямом канале $T_2 = 99,2 \cdot 10^{-3}$ с.

В качестве регулятора потокосцепления принимаем ПИ-регулятор с передаточной функцией

$$W(p)_{\text{р}\Psi} = k_{\text{р}\Psi} \cdot \frac{T_{\text{р}\Psi} \cdot p + 1}{T_{\text{р}\Psi} \cdot p} \quad (107)$$

и настраиваем контур потокосцепления на модульный оптимум

$$T_{\text{р}\Psi} = T_2 = 0,099 \text{ с}$$

– постоянная времени регулятора потокосцепления;

$$k_{\delta\Psi} = \frac{\dot{O}_2 \cdot k_{\delta}}{L_m \cdot k_{\Psi}} \cdot \frac{1}{a_{\Psi} \cdot \dot{O}_{\mu\Psi\dot{\gamma}}} = \frac{99,2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,002455}{0,01207 \cdot 0,905} \cdot \frac{1}{2 \cdot 1,3 \cdot 10^{-3}} = 8,575$$

– коэффициент усиления регулятора потокосцепления,

где $\dot{O}_{\mu\Psi\dot{\gamma}} = \dot{O}_{\delta} + \dot{O}_{\varepsilon\Psi\hat{\gamma}} = 3 \cdot 10^{-4} + 1 \cdot 10^{-3} = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ с}$

$a_{\Psi} = 2$ – коэффициент оптимизации контура потокосцепления;

Коэффициент передачи датчика линейного потокосцепления

$$k_{\ddot{a}\delta} = \frac{0,5 \cdot 2^n}{\sigma_{\Psi} \cdot \Psi_{2f}} = \frac{2048}{1,2 \cdot 0,921} = 1853$$

Коэффициент согласования сигналов обратной связи и задания на поток

$$k_{\hat{\gamma}\ddot{n},\delta} = \frac{1}{0,5 \cdot 2^n} = \frac{1}{2048} = 4,883 \cdot 10^{-4}$$

Коэффициент обратной связи по амплитудному значению фазного тока

$$k_{\Psi} = k_{\ddot{a}\Psi} \cdot k_{\hat{\gamma}\ddot{n},\Psi} = 1853 \cdot 4,883 \cdot 10^{-4} = 0,905$$

4.4 Оптимизация контура скорости

4.4.1 Структурная схема и параметры элементов контура

При оптимизации контура скорости внутренний оптимизированный замкнутый контур тока представлен усеченной передаточной функцией 1-го порядка

$$W(p)_{\text{Т зам}} \approx \frac{1}{T_{\text{Т}} \cdot p + 1}, \quad (112)$$

где $\dot{O}_{\delta} = \dot{a}_{\delta} \cdot \dot{O}_{\mu\dot{\gamma}} = 2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-4} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ с}$ – эквивалентная постоянная времени оптимизированного контура потокосцепления, с.

Структурная схема контура скорости приведена на рисунке 22.

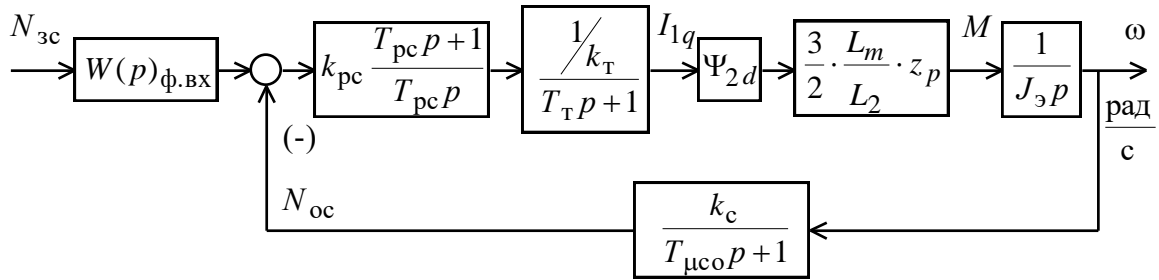


Рисунок 22 – Структурная схема контура скорости с ПИ-регулятором

Передаточная функция ПИ-регулятора скорости

$$W(p)_{\text{pc}} = k_{\text{pc}} \cdot \frac{T_{\text{pc}}p + 1}{T_{\text{pc}} \cdot p}. \quad (113)$$

Коэффициент усиления и постоянная времени регулятора скорости определяются по выражениям

$$k_{\text{дн}} = \frac{J_{\text{э}} \cdot k_{\text{д}}}{\Psi_{2\text{д}} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot k_{\text{н}}} \cdot \frac{1}{a_c \cdot \dot{\theta}_{\text{мн}}} =$$

$$= \frac{1,355 \cdot 0,002455}{0,921 \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{0,01207}{0,01229} \cdot 3 \cdot 7,384 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{1}{2 \cdot 1,3 \cdot 10^{-3}} = 42,573; \quad (114)$$

$$\dot{\theta}_{\text{дн}} = b_c \cdot a_c \cdot \dot{\theta}_{\text{мн}} = 2 \cdot 2 \cdot 1,3 \cdot 10^{-3} = 5,2 \cdot 10^{-3} \text{ н},$$

где

$$\dot{\theta}_{\text{мн}} = \dot{\theta}_{\text{д}} + \frac{\dot{\theta}_{\text{дн}}}{n_c} = 3 \cdot 10^{-4} + 10^{-3} = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ с}$$

– коэффициент обратной связи по скорости;

$$\omega_{\text{р.макс}} = 90,254 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \text{ – принятое при настройке контура значение мак-}$$

симальной скорости электропривода;

$$N_{\text{зс макс}} = 1 \text{ – принятое максимальное значение напряжения задания}$$

на входе контура скорости;

$$b_c = a_c = 2 \text{ – коэффициенты оптимизации контура скорости.}$$

5 АНАЛИЗ НЕЛИНЕЙНОЙ САУ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ОДНОМАС- СОВОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ

Структурная схема нелинейной САУ частотно-регулируемого электропривода механизма подъёма крана приведена на рисунке 29.

Структурная схема рисунка 30 составлена на основании структурной схемы линеаризованной САУ электропривода (рисунок 16) и учитывает следующие основные нелинейности элементов системы управления электропривода:

– насыщение регуляторов тока, потокосцепления и скорости

$$N_{\text{рт макс}} = \pm 1, N_{\text{рψ макс}} = \pm 1, N_{\text{рс макс}} = \pm 1;$$

– ограничение напряжения задания на ток

$$N_{\text{зт макс}} = 1;$$

– ограничение выходного напряжения инвертора

$$E_{\text{и}} = \pm \sqrt{2} \cdot U_{\text{1фн}} = \pm \sqrt{2} \cdot 220 = \pm 311,127 \text{ В}; \quad (125)$$

– момент сопротивления типа сухого трения (реактивный по характеру)

$$M_{\text{с}}(\omega) = M_{\text{с}} \cdot \text{sign}\omega, \quad (126)$$

где

$$M_{\text{с}} = M_{\text{сдв}} + M_{\text{спост}} = 34,422 + 65,89 = 100,312 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (127)$$

5.1 Контур потокосцепления

Структурная схема контура потокосцепления приведена на рисунке 25. Параметры элементов контура потокосцепления сведены в таблицу 9.

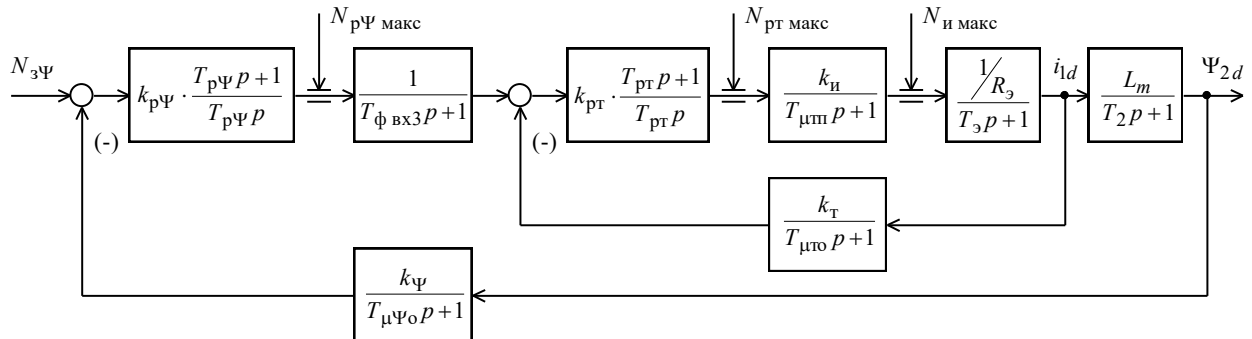


Рисунок 25 – Структурная схема контура регулирования потокосцепления

Таблица 9 – Параметры элементов контура потокосцепления

$N_{3\Psi}$	$k_{p\Psi}$	$T_{p\Psi}, \text{с}$	$k_{\Psi}, \text{В/Вб}$	$T_{\mu\Psi o}, \text{с}$	$T_{\phi \text{ вх}}, \text{с}$	$k_{и}$	$k_{pт}$
1	10,43	0,099	1,086	0,001	0,000166	311,1	0,588

Продолжение таблицы 9

$T_{pт}, \text{с}$	$k_T, \text{В/А}$	$T_{\mu то}, \text{с}$	$T_{\mu пп}, \text{с}$	$R_э, \text{Ом}$	$T_э, \text{с}$	$L_m, \text{Гн}$
0,001532	0,00413	0,000166	0,0000833	0,247	0,001532	0,01207

Окончание таблицы 9

$T_2, \text{с}$	$\Psi_{2дн}, \text{Вб}$	$N_{p\Psi \text{ макс}}$	$N_{pт \text{ макс}}$	$E_{и \text{ макс}}, \text{В}$
0,099	0,921	± 1	± 1	$\pm 311,12$

По структурной схеме рисунка 25 набирается имитационная модель контура потокосцепления, согласно [13], приведенная на рисунке 26. В состав имитационной модели рисунка 26 входят суперблоки:

- контура тока (рисунок 27);
- регулятора тока (рисунок 28);
- регулятора потокосцепления (рисунок 29).

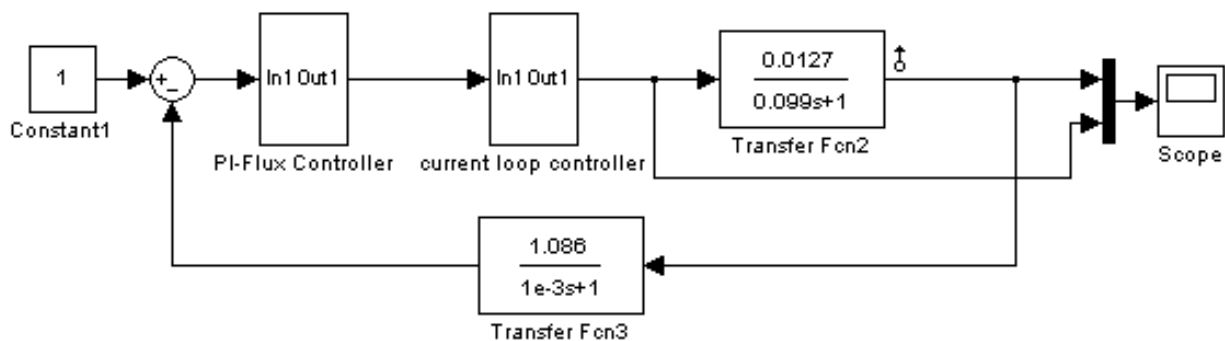


Рисунок 26 – Схема набора имитационной модели контура потокосцепления

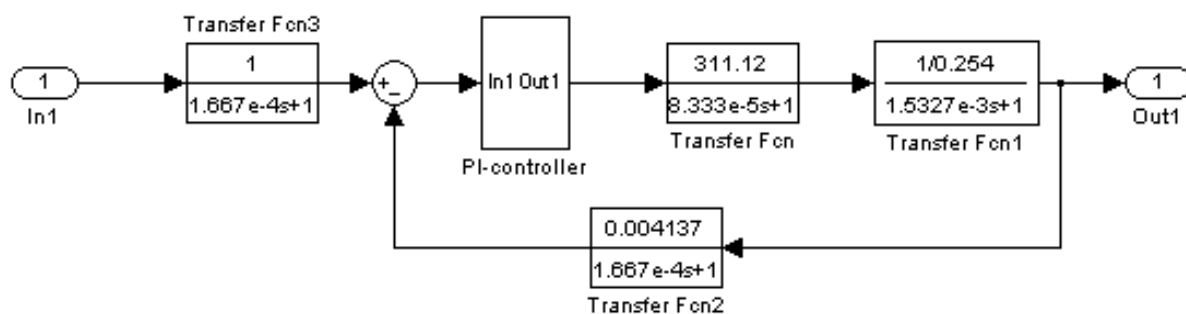


Рисунок 27 – Схема набора имитационной модели контура тока

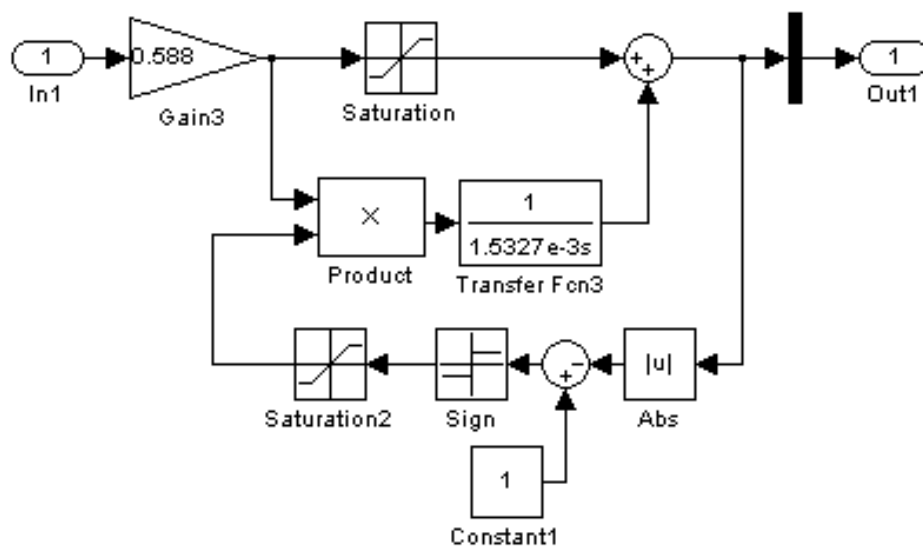


Рисунок 28 – Схема набора имитационной модели регулятора тока

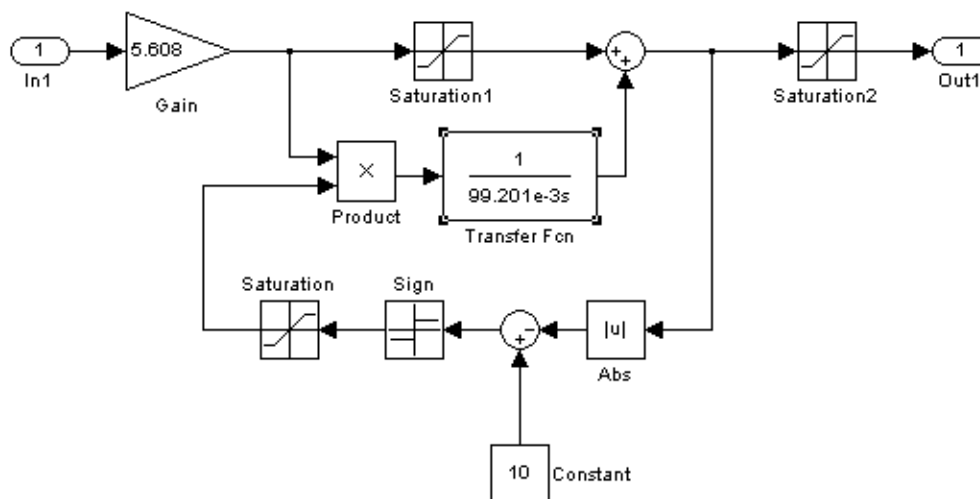


Рисунок 29 – Схема набора имитационной модели регулятора
потокосцепления

Программа имитационных исследований контура потокосцепления включает в себя оценку процесса формирования номинального значения потокосцепления двигателя. На рисунке 30 приведены временные диаграммы изменения тока намагничивания $I_{1d}(t)$ и потокосцепления $\Psi_{2d}(t)$ при ступенчатом задании управления на входе контура $N_{3\Psi} = 1$.

Процесс формирования потокосцепления двигателя характеризуется следующими количественными показателями:

- установившееся значение потокосцепления $\Psi_{2d} = \Psi_{2н} = 0,921 \text{ Вб}$;
- статическая ошибка отработки заданного значения потокосцепления $\Delta\Psi_{уст} = 0$;
- время достижения значения $0,95 \cdot \Psi_{2d \text{ уст}} \quad t_1^{(5)} = 0,029 \text{ с}$.

Внутренний контур тока обеспечивает ограничение максимального значения тока на уровне $I_{1d \text{ макс}} = I_{1q \text{ макс}} = 241,6 \text{ А}$ и установившееся значение тока равное $I_{1d \text{ уст}} = \sqrt{2} \cdot I_0 = \sqrt{2} \cdot 53,946 = 76,2 \text{ А}$.

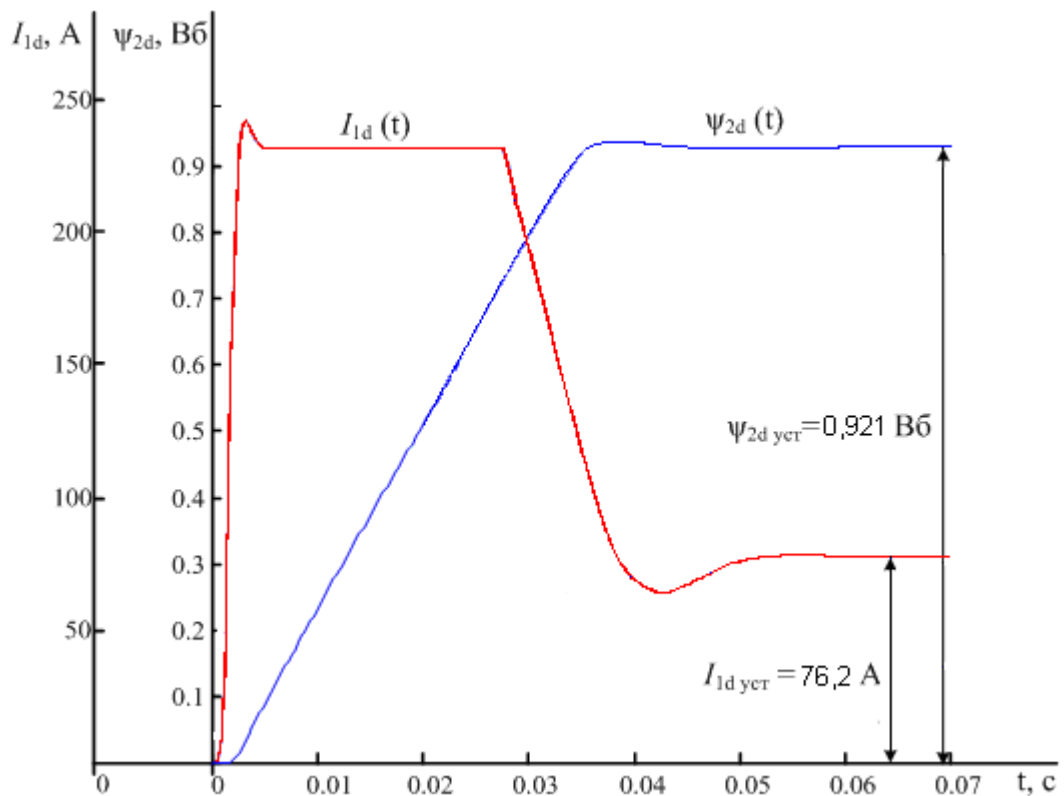


Рисунок 30 – Переходные процессы в контуре потокоцепления при $U_{\text{з}\Psi} = 1 \text{ В}$

5.2 Контур скорости

Структурная схема контура скорости приведена на рисунке 31. Параметры элементов контура скорости сведены в таблице 10. По структурной схеме рисунка 31 набирается имитационная модель контура скорости, представленная на рисунке 32.

В состав имитационной модели рисунка 32 входят суперблоки:

- контура тока (рисунок 27);
- регулятора скорости (рисунок 33);
- механической системы приемного устройства (рисунок 34).

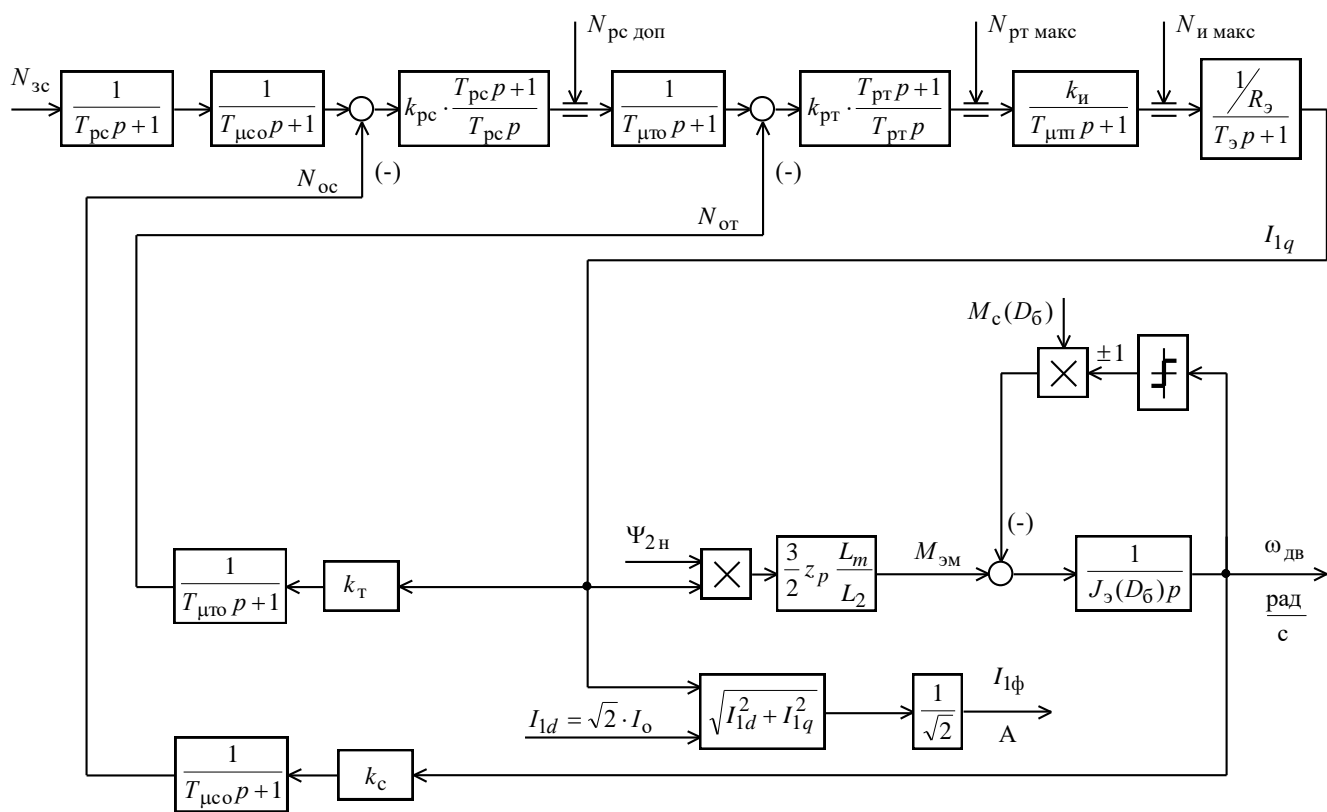


Рисунок 31 – Структурная схема контура скорости

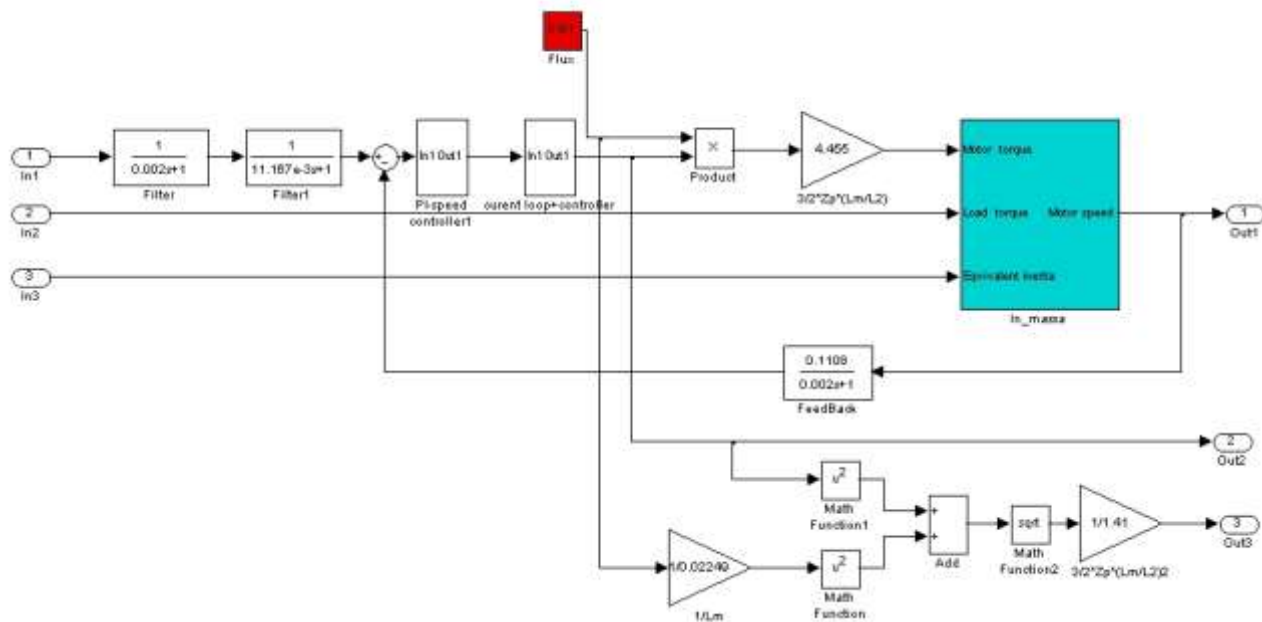


Рисунок 32 – Схема набора имитационной модели контура скорости

Таблица 10 – Параметры элементов контура скорости

$T_{\phi \text{ вх1}},$ с	$T_{\phi \text{ вх2}},$ с	k_{pc}	$T_{pc},$ с	$k_c,$ В·с/рад	$T_{\mu co},$ с	k_{pr}	T_{pr} с	$k_T,$ В/А	$T_{\mu to},$ с	$k_{и}$
0,006	0,001	41,43	0,006	0,011	0,001	0,588	0,00153	0,00413	0,000166	311,1

Продолжение таблицы 10

$T_{\mu пп},$ с	$R_3,$ Ом	$T_3,$ с	$\Psi_{2дн},$ Вб	$L_m,$ Гн	$L_2,$ Гн	z_p	$J_3, \text{кг} \cdot \text{м}^2$	$\omega_{p.макс},$ рад/с	$I_{1qмакс},$ А	$N_{рег.макс}$	$U_{и макс}, \text{В}$
0,0000833	0,247	0,00153	0,921	0,01207	0,01229	3	1,355	90,254	241,6	± 1	$\pm 311,12$

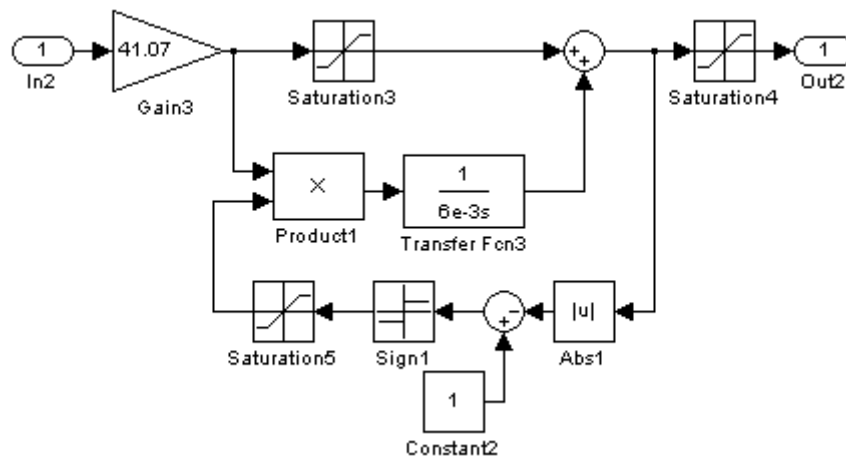
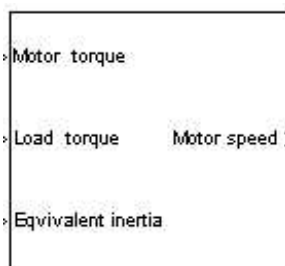
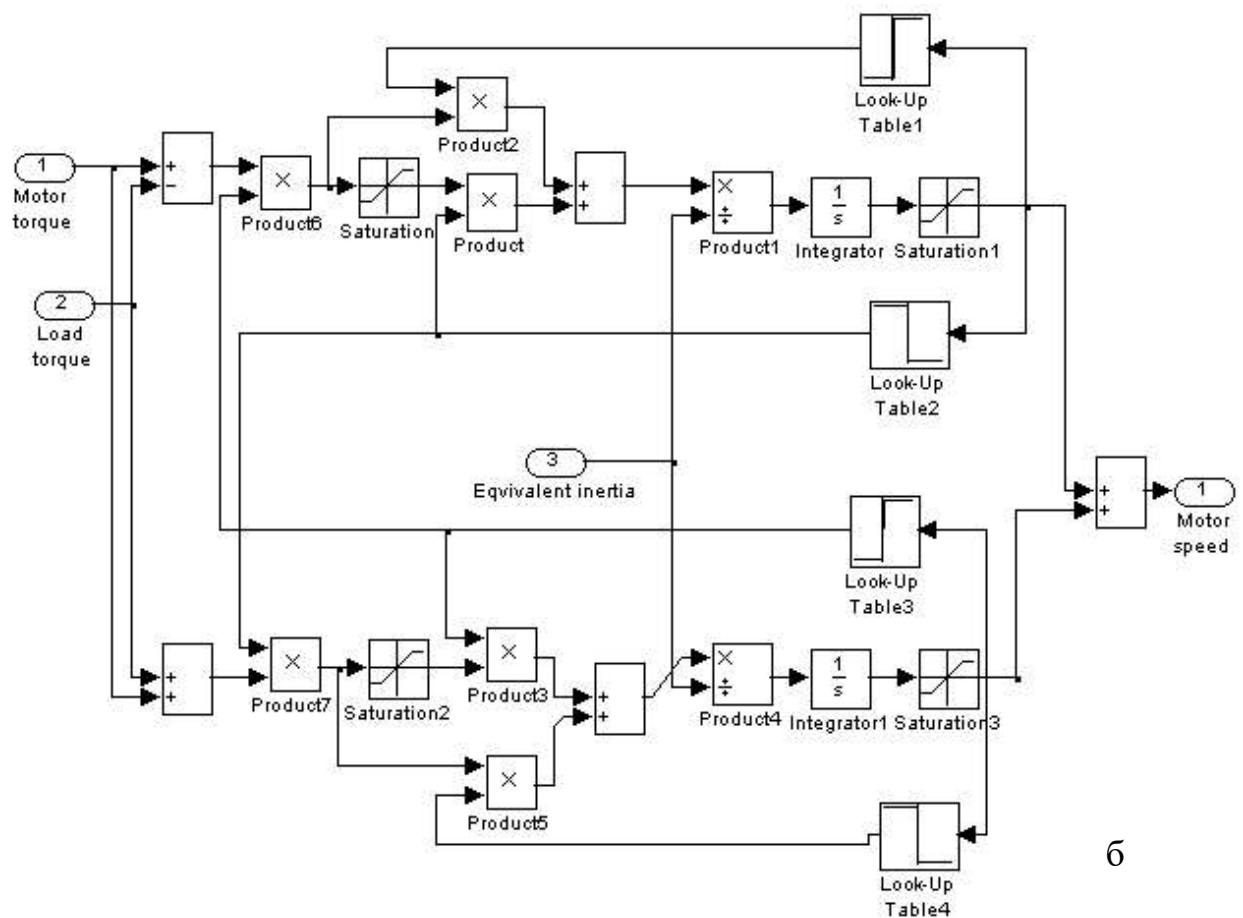


Рисунок 33 – Схема набора имитационной модели регулятора скорости



а



б

Рисунок 34 – Схема набора имитационной модели механической системы: а – суперблок; б – схема набора модели

5.3 Имитационная модель нелинейной САУ электропривода механизма подъема

На основании структурной схемы (рисунок 35) в пакете Simulink системы MatLab разработана имитационная модель нелинейной САУ частотно-регулируемого электропривода механизма подъема крана, основными компонентами которой являются:

- имитационная модель двухфазного АД с короткозамкнутым ротором во вращающейся системе координат, ориентированной по вектору потока сцепления ротора, составленная на основании структурной схемы рисунка 16 [13];
- модели ПИ–регуляторов тока и скорости, реализованных во вращающейся системе, составлены по структурным схемам, и представлены в виде суперблоков, показанных на рисунках 36 и 37;
- одномассовая механическая система с постоянным значением момента сопротивления реактивного характера моделируется суперблоком, приведенным на рисунке 30.

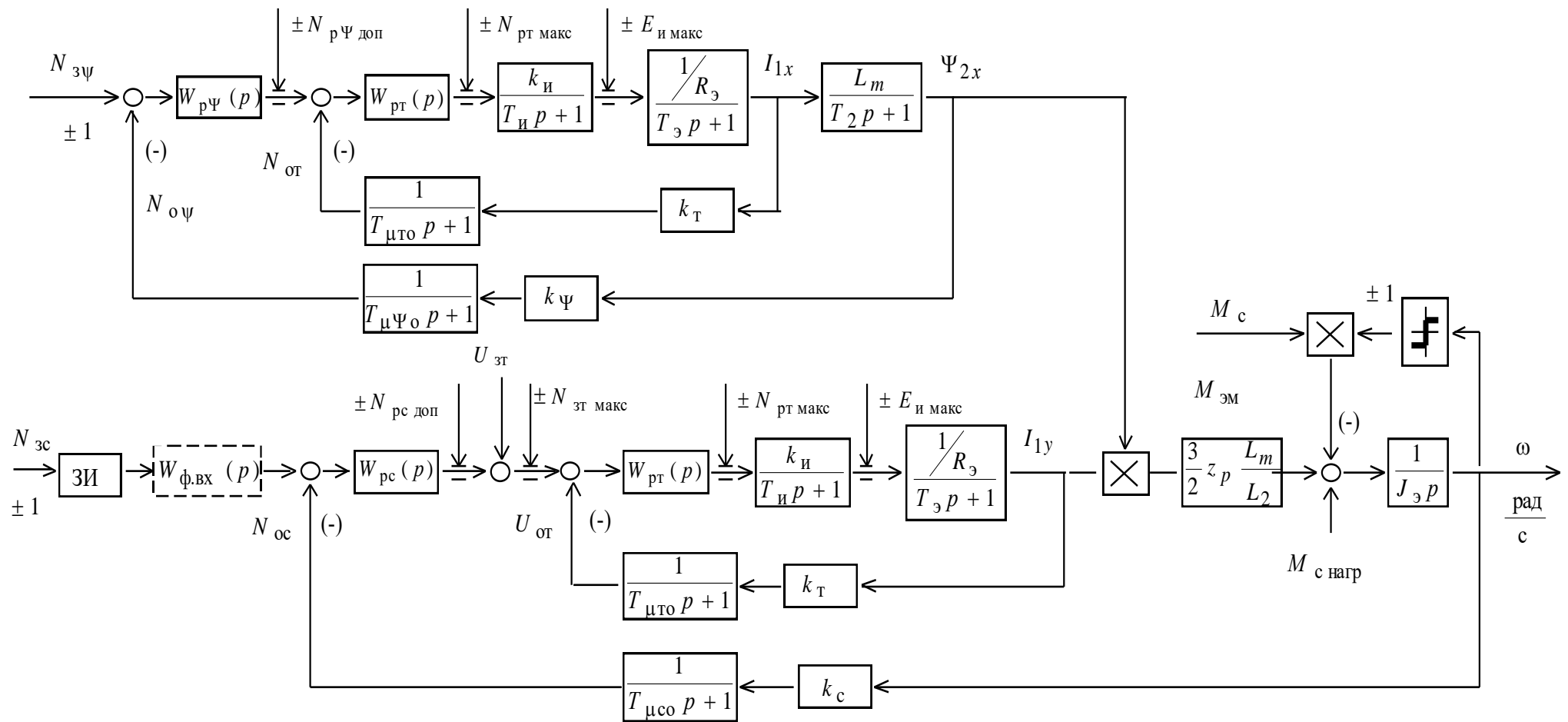
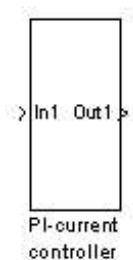
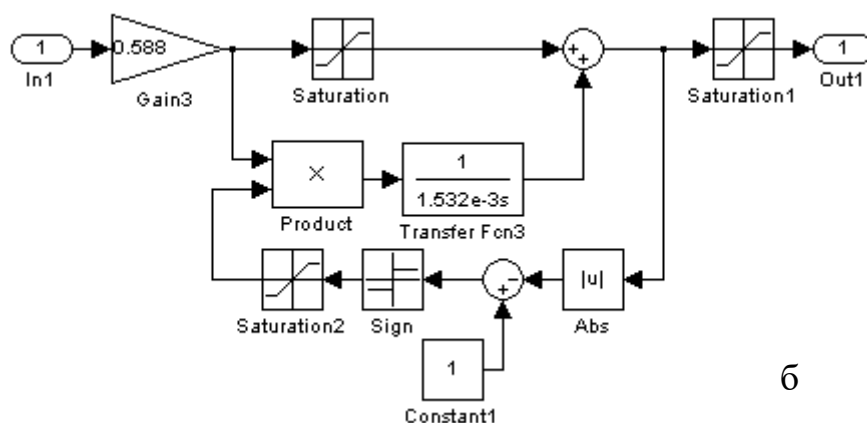


Рисунок 35 – Структурная схема нелинейной непрерывной САУ частотно-регулируемого электропривода механизма подъема при векторном управлении



а

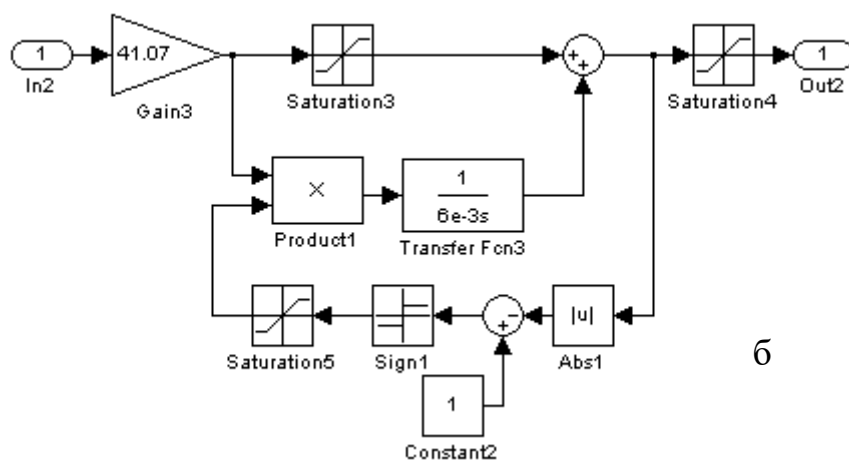


б

Рисунок 36 – Имитационная модель ПИ–регулятора тока с постоянным ограничением: а – суперблок; б – схема набора модели



а



б

Рисунок 37 – Имитационная модель ПИ–регулятора скорости с постоянным ограничением: а – суперблок; б – схема набора модели

```

graph TD
    A[Ref.current (lowering)] --> D[Weight Estimator]
    B[Ref.current (lifting)] --> D
    C[Speed controller output] --> D
  
```

79

управления электропривода. Простейшим задатчиком скорости является линейный задатчик. Фактически установка линейного задатчика скорости обеспечивает постоянное значение темпа нарастания (спадания при торможении) скорости, т.е. постоянное ускорение (замедление) привода, что достигается поддержанием постоянного значения динамического момента электропривода.

При этом электромагнитный момент электродвигателя и его максимальное значение зависят от значения статического момента нагрузки. Задатчик интенсивности с s – образной характеристикой позволит дополнительно ограничить вторую производную скорости (темп нарастания динамического момента электропривода) и тем самым повысить плавность переходных процессов в электроприводе.

Модель задатчика интенсивности с s – образной характеристикой принята аналоговой с максимальным значением входного и выходного напряжения 10 В (рисунок 34). Схема набора имитационной модели задатчика интенсивности с s – образной характеристикой [7] представлена на рисунке 40. В соответствии с расчетами, приведенными в разделе 2.7, приняты следующие параметры:

$$t_1 = 0,5 \text{ с}, \quad t_2 = 1 \text{ с}, \quad T_{\text{зи}} = 2 \cdot t_1 + t_2 = 2 \cdot 0,5 + 1 = 2 \text{ с}.$$

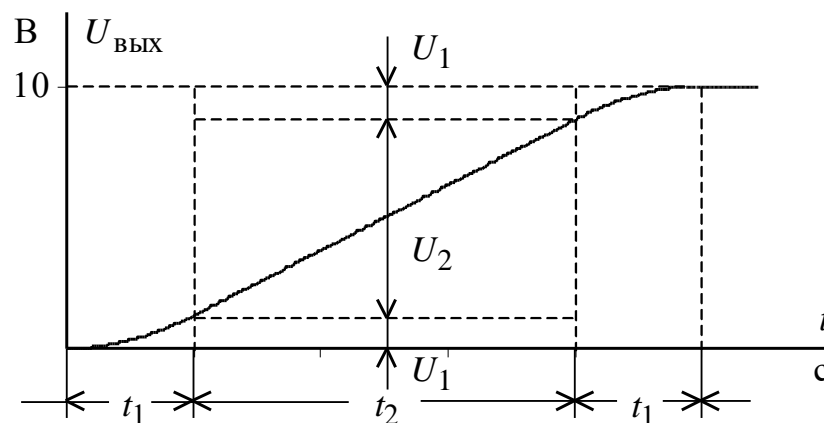


Рисунок 39 – Временная характеристика s – образного задатчика интенсивности

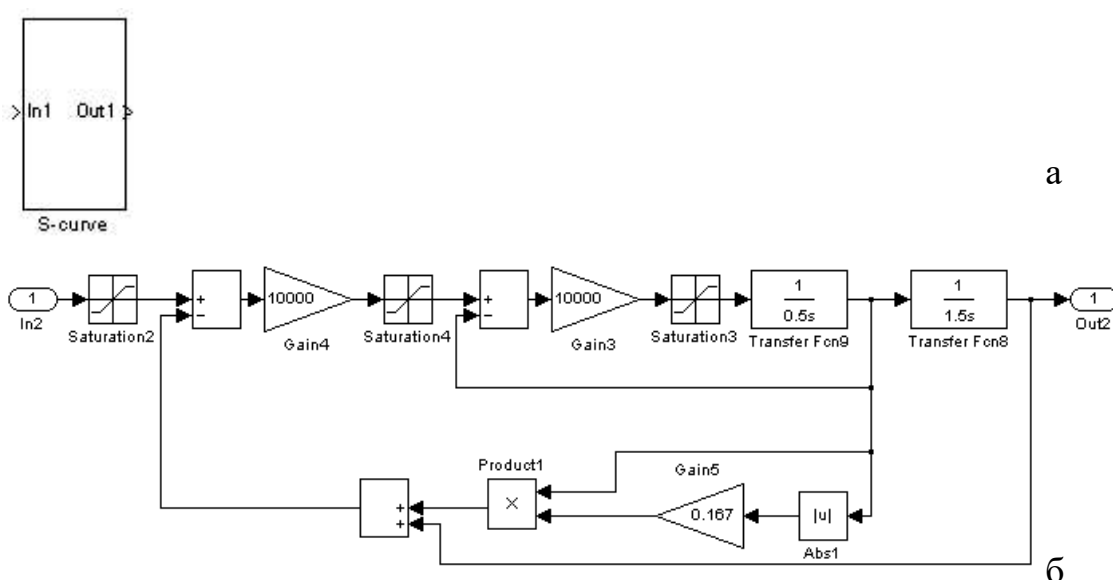


Рисунок 40 – Имитационная модель задатчика интенсивности с s – образной характеристикой: а – суперблок; б – схема набора модели

5.4 Имитационные исследования частотно–регулируемого асинхронного электропривода механизма подъема крана

Имитационные исследования электропривода механизма подъема крана проводятся с целью проверки его работоспособности в следующих основных технологических режимах: пуск на любую рабочую скорость; подъем с заданной скоростью; торможение; останов в режиме электрического торможения; пуск с заданной скоростью; торможение и останов электропривода в режиме электрического торможения.

В процессе имитационных исследований рассмотрены следующие режимы работы системы электропривода:

- весоизмерение и формирование задания на ток в режиме подъёма и спуска;
- пуск электропривода на заданную рабочую скорость подъёма груза;
- торможение и останов электропривода при подъёме;
- пуск электропривода на заданную рабочую скорость спуска;
- торможение и останов электропривода при спуске груза.

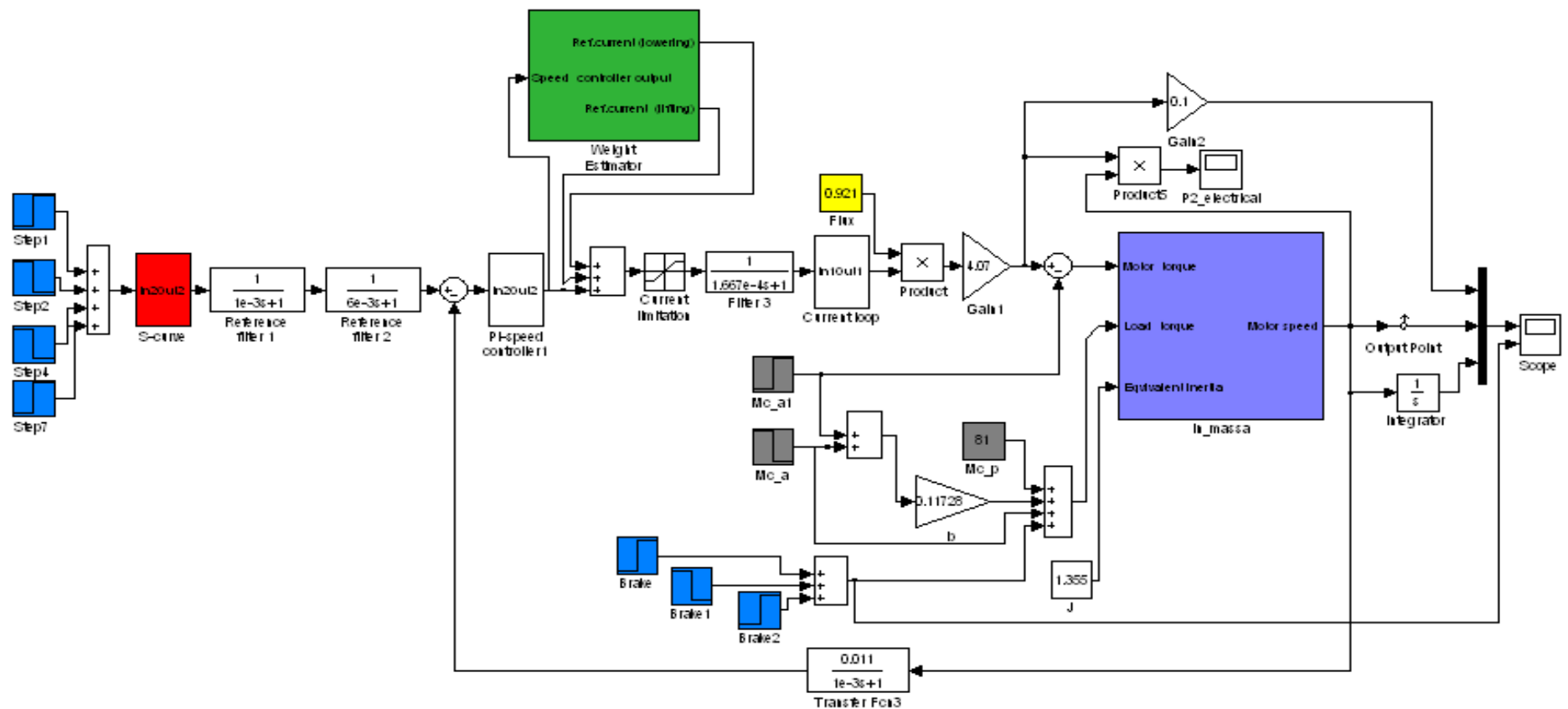


Рисунок 41 – Имитационная модель нелинейной САУ РЭП механизма подъема крана
в среде Simulink/Matlab

В качестве примера на рисунках 32 и 33 приведена отработка электроприводом подъемного механизма принятого цикла при подъёме и спуске максимального груза и пустого грузозахватывающего устройства соответственно.

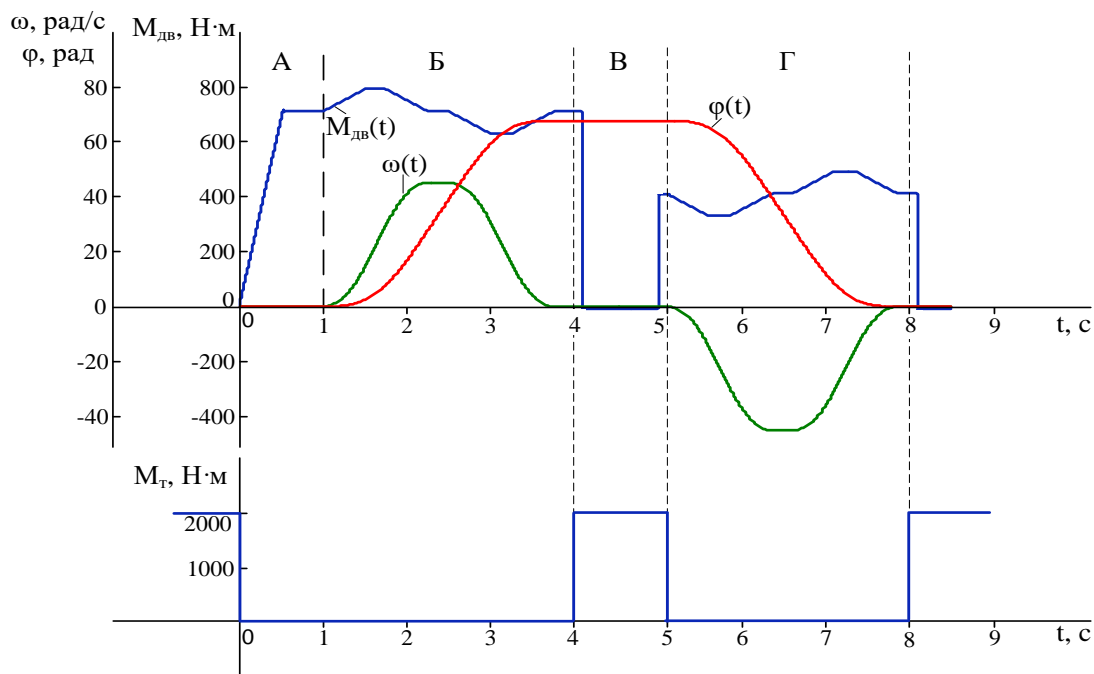


Рисунок 42 – Результаты имитационных исследований отработки электроприводом механизма подъёма заданного цикла при подъеме/спуске максимального груза $M_{гр.макс} = 561,8 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $U_{зс} = 1 \text{ В}$

А – весоизмерение; Б – подъем; В – пауза; Г – спуск

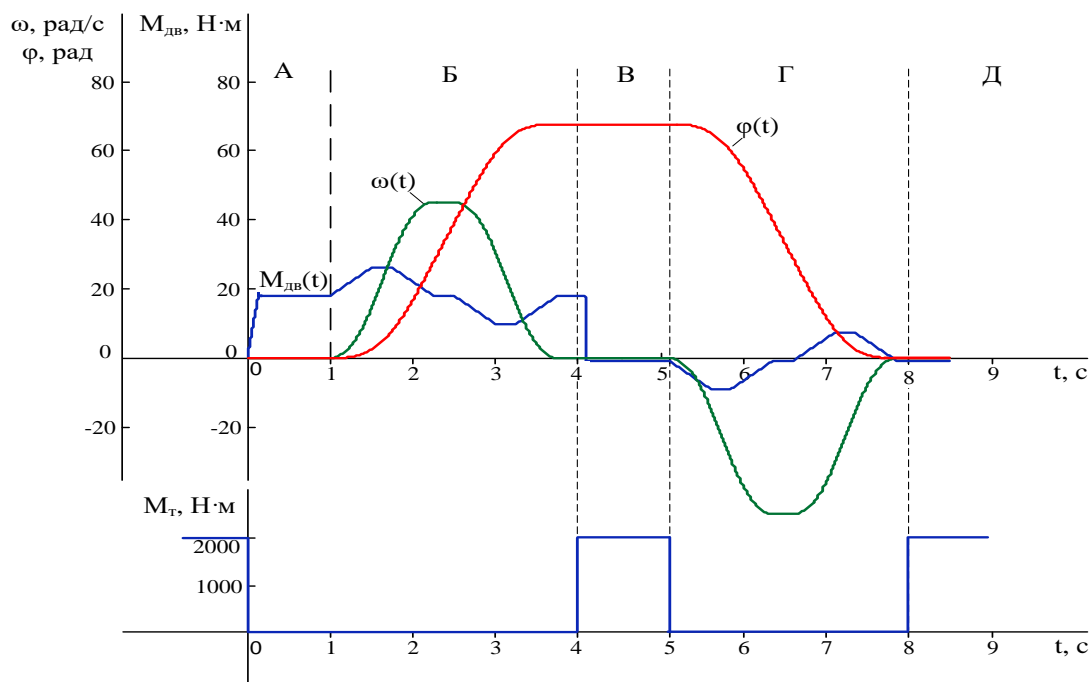


Рисунок 43 – Результаты имитационных исследований отработки электроприводом механизма подъёма заданного цикла при подъеме/спуске пустого грузозахватывающего устройства $M_{гр.мин} = 86,275 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $U_{зс} = 1 \text{ В}$
 А – весоизмерение; Б – подъем; В – пауза; Г – спуск

На рисунке 44 показаны графики электромагнитной мощности, передаваемой от статора к ротору при подъеме и от ротора к статору при спуске. С учетом электрических потерь и потерь в стали. Эти графики позволяют оценить потребляемую из сети мощность и мощность, возвращаемую в звено постоянного тока.

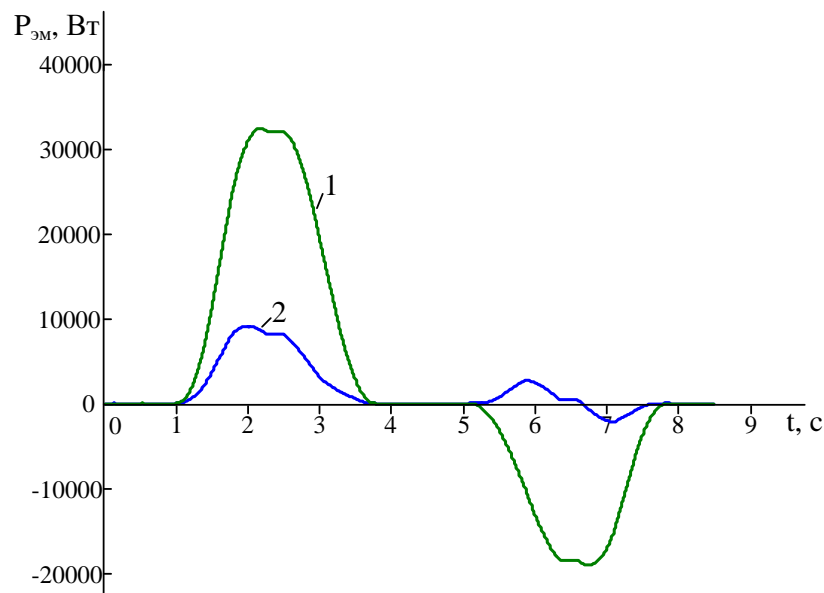


Рисунок 44 – Графики электромагнитной мощности $U_{зс} = 1$ В
 1 – при подъеме/спуске максимального груза $M_{гр.макс} = 561,8 \text{ Н} \cdot \text{м}$ 2 – пустого
 грузозахватывающего устройства $M_{гр.мин} = 86,275 \text{ Н} \cdot \text{м}$

Выводы: Полученные результаты имитационных исследований доказывают, что асинхронный частотно-регулируемый электропривод при векторном управлении обеспечивает требуемый диапазон регулирования скорости механизма подъема крана. Переходные процессы в электроприводе протекают плавно с ограничением динамического момента, токов двигателя и преобразователя. Время пуска и электрического торможения электропривода определяется и может быть изменено путем выбора значения постоянной времени задатчика скорости.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
3-5Г5А1	Тошболтаев Шавкат Мумин угли

Школа	ИШНПТ	Отделение школы (НОЦ)	
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г. Томска. Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием НИ ТПУ.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Норма амортизационных отчислений на специальное оборудование
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления во внебюджетные фонды 30 %

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Анализ конкурентных технических решений ИР	Расчет конкурентоспособности SWOT-анализ
2. Формирование плана и графика разработки и внедрения ИР	Структура работ; Определение трудоемкости; Разработка графика проведения исследования
3. Составление бюджета инженерного проекта (ИП)	Расчет бюджетной стоимости ИР по разработке стенда
4. Оценка ресурсной эффективности ИР	Расчет: Интегральный финансовый показатель разработки; Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки; Интегральный показатель эффективности;

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей)

1. Оценка конкурентоспособности ИР
2. Матрица SWOT
3. Диаграмма Ганта
4. Инвестиционный план. Бюджет ИП
5. Основные показатели эффективности ИП

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Кашук Ирина Вадимовна	К.Т.Н ДОЦЕНТ		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г5А1	Тошболтаев Шавкат Мумин угли		

6 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Многие промышленные предприятия, активно использующие электрические грузоподъемные краны, сталкиваются с проблемой несоответствия подъемного оборудования современным техническим требованиям. В настоящее время, являются одним из основных средств механизации перегрузочных и складских работ в различных отраслях народного хозяйства. Козловые подъемные машины долговечны и эксплуатируются десятки лет. Учитывая их производительность, они приносят хороший доход.

В семействе козловых подъемных устройств достойное место занимает уникальный по своему применению кран козловой ЛТ 62. Козловой кран ЛТ-62 обеспечивает непрерывную погрузку и выгрузку в крупных складских терминах, складах, также находит применение на монтаже конструкций.

В связи с тем, что главную роль в создании условий высокой производительности подъемно-транспортного оборудования отводится электроприводу, то с учетом сложной специфики работы такого оборудования необходимо отдавать предпочтение простым и высоконадежным системам электроприводов. Механизм горизонтального передвижения козлового крана выполняется на основе двухдвигательного электропривода для обеспечения заданных эксплуатационных показателей выполняет все предъявляемые к нему требования и обеспечивать высокую надежность работы оборудования.

Анализ технической целесообразности заключается в выявлении преимуществ и недостатков, с точки зрения повышения технического уровня, в замене однодвигательного электропривода на двухдвигательный электропривод соответствии с техническими условиями.

Данный раздел, предусматривает рассмотрение следующих задач:

- Оценка коммерческого потенциала разработки.
- Планирование научно-исследовательской работы;
- Расчет бюджета научно-исследовательской работы;

- Определение ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности исследования.

6.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения

6.1.1 Анализ конкурентных технических решений

Анализ конкурентных технических решений позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения.

Данный анализ проведен с помощью оценочной карты.

В рамках данной работы произведем сравнение систем управления двух-двигательным приводом: 1) с обратной связью по скорости каждого двигателя; 2) векторное с обратной связью по скорости одного двигателя; 3) скалярное.

Таблица 11 - Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		Б _ф	Б _{к1}	Б _{к2}	К _ф	К _{к1}	К _{к2}
1	2	3	4	5	6	7	8
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
Повышение производительности труда	0.05	1	1	1	0.05	0.05	0.05
Синхронизация скорости вращения	0.1	5	4	4	0.5	0.4	0.4
Уровень шума	0.075	4	3	3	0.3	0.225	0.225
Надежность	0.05	4	3	3	0.2	0.15	0.15
Безопасность	0.1	5	3	3	0.5	0.3	0.3
Энергоэкономичность	0.125	4	1	1	0.5	0.125	0.125
Экономические критерии оценки эффективности							

Конкурентоспособность продукта	0.1	5	4	4	0.5	0.4	0.4
Уровень проникновения на рынок	0.05	5	5	5	0.25	0.25	0.25
Цена	0.075	5	3	3	$\frac{0.37}{5}$	0.225	0.225
Предполагаемый срок эксплуатации	0.1	3	3	3	0.3	0.3	0.3
Послепродажное обслуживание	0.075	4	4	4	0.3	0.3	0.3
Финансирование научной разработки	0.05	4	2	2	0.2	0.1	0.1
Наличие сертификации разработки	0.05	2	1	1	0.1	0.05	0.05
Итого	1	51	37	37	4.07	2.87	2.87

Согласно составленной оценочной карте наиболее конкурентоспособным в данной ситуации является вариант системы управления 1. Изучив их преимущества, делаем вывод о том, что спрос на предоставляемое техническое решение является наиболее оптимальным.[29]

6.1.2 SWOT анализ

Для реализации данного проекта проведем SWOT-анализ, который позволит оценить сильные и слабые стороны проекта, а также определить возможности проекта и угрозы.

SWOT-анализ представлен в табличной форме 12.

Таблица 12 - Матрицы SWOT

	Сильные стороны проекта: С1: Отсутствие необходимости более чем двух участников проекта С2: Универсальность разработки С3: Возможность разработки имитационной модели без применения сложного дорогостоящего оборудования С4: Нет необходимости в реальных опытных образцах С5: Знания участников проекта в данной области	Слабые стороны проекта: Сл1: Сложность системы Сл2: Работоспособность системы зависит от множества параметров Сл3: Не проработаны пути продвижения на рынок Сл4: Повышение стоимости материалов
Возможности проекта: В1: Разработка позволит достичь лучшего качества выдаваемого материала В2: Внедрение данной разработки в производство В3: Повышение надежности узлов и агрегатов В4: Использование полученных знаний в дальнейших исследованиях	В1В2С1С3: возможность внедрения новых технологий без дополнительных затрат при помощи создания имитационных моделей В3В4С2С5: возможность расширения области применения разработки	В2В3Сл1Сл2: требуется дополнительные затраты на повышение квалификации персонала эксплуатирующей организации
Угрозы проекта: У1: Развитая конкуренция, появление более надежных агрегатов У2: Введение дополнительных государственных требований к сертификации продукции. У3: Отсутствие спроса данной разработки	У3С2С3С5: внедрение разработки в другие сферы народного хозяйства У1У2С3С5: оптимизировать работу коллектива что снизит время на выполнение работ. При этом за счет опытного научного руководителя качество проводимых исследований останется высокой.	У1Сл3Сл4: использовать рекламу

В ходе анализа были изучены сильные стороны и возможности проекта, а также обозначены его слабые стороны и угрозы, которые необходимо учесть при реализации проекта.

6.2 Планирование научно-исследовательских работ

6.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование комплекса научно-исследовательских работ осуществляется в порядке:

- определение структуры работ в рамках научного исследования;
- определение количества исполнителей для каждой из работ;
- установление продолжительности работ;
- построение графика проведения научных исследований.

Для оптимизации работ удобно использовать классический метод линейного планирования и управления.

Результатом такого планирования является составление линейного графика выполнения всех работ. Порядок этапов работ и распределение исполнителей для данной научно-исследовательской работы, приведен в таблице 13.

Таблица 13 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Должность исполнителя
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления исследований	2	Выбор направления исследований	Руководитель
			Инженер
	3	Календарное планирование работ по проекту	Руководитель
	4	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер
Теоретические исследования	5	Обзор технических характеристик и назначение козлового крана, требования предъявляемые к приводу передвижения	Инженер
Расчеты и моделирование	6	Выбор оборудования и расчет, выбор преобразователя, оптимизация контуров регулирования, разработка имитационной модели	Инженер
Обобщение и	7		Руководитель

оценка результатов		Анализ возможных вариантов исполнения устройства и компьютерное моделирование	Инженер
Контроль и координирование проекта	8	Контроль качества выполнения проекта и консультирование исполнителя	Руководитель
Разработка технической документации и проектирование	8	Разработка принципиальной схемы	Инженер
	10	Технико-экономические расчеты	Инженер
	11	Составление пояснительной записки (эксплуатационно-технической документации)	Инженер

6.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения

При проведении научных исследований основную часть стоимости разработки составляют трудовые затраты, поэтому определение трудоемкости проводимых работ является важным этапом составления бюджета.

Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости использована следующая формула:

$$t_{\text{ож}i} = \frac{3t_{\text{mini}} + 2t_{\text{max}i}}{5},$$

где $t_{\text{ож}i}$ — ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы, человеко-дни;

t_{mini} — минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, человеко-дни;

$t_{\text{max}i}$ — максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы, человеко-дни.

Зная величину ожидаемой трудоемкости, можно определить продолжительность каждой i -ой работы в рабочих днях T_{pi} , при этом

учитывается параллельность выполнения работ разными исполнителями.
Данный расчёт позволяет определить величину заработной платы.

$$T_{pi} = \frac{t_{oji}}{Ч_i},$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, рабочие дни;

t_{oji} – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, человеко-дни;

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Для перевода длительности каждого этапа из рабочих в календарные дни, необходимо воспользоваться формулой (4.3):

$$T_{ki.инж} = T_{pi} \cdot k_{кал},$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i-й работы в календарных днях;

T_{pi} – продолжительность выполнения i-й работы в рабочих днях;

$k_{кал}$ – календарный коэффициент.

Таблица 14 – Временные показатели проведения научного исследования

Название работы	Трудоёмкость работ						Длительность работ в рабочих днях, T_{pi}		Длительность работ в календарных днях, T_{ki}	
	t_{min} , чел-дни		t_{max} , чел-дни		t_{oji} , чел-дни					
	Руководи тель	Инженер	Руководи тель	Инженер	Руководи тель	Инженер	Руководи тель	Инженер	Руководи тель	Инженер
Составление и утверждение задания	2	-	3	-	2,4	-	2,4	-	3	-
Выбор направления исследований	2	2	3	3	2,4	2,4	1,2	1,2	2	2
Календарное планирование работ по проекту	1	-	2	-	1,4	-	1,4	-	2	-
Подбор и изучение материалов по теме	-	3	-	4	-	3,4	-	3,4	-	5
Обзор технических характеристик и назначение козлового крана	-	3	-	4	-	3,4	-	3,4	-	5

Выбор оборудования, преобразователя, оптимизация контуров регулирования, разработка имитационной модели	-	4	-	5	-	4,4	-	4,4	-	7
Анализ возможных вариантов исполнения устройства и компьютерное моделирование	2	2	3	3	2,4	2,4	1,2	1,2	2	2
Контроль качества выполнения проекта и консультирование исполнителя	1	1	3	3	1,8	1,8	0,9	0,9	1	1
Разработка принципиальной схемы	-	1	-	2	-	1,4	-	1,4	-	2
Технико-экономические расчеты	-	2	-	3	-	2,4	-	2,4	-	4
Составление пояснительной записки (эксплуатационно-технической документации)	-	2	-	3	-	2,4	-	2,4	-	4

На основе таблицы составлен календарный план-график выполнения проекта с использованием диаграммы Ганта (таблица 15).

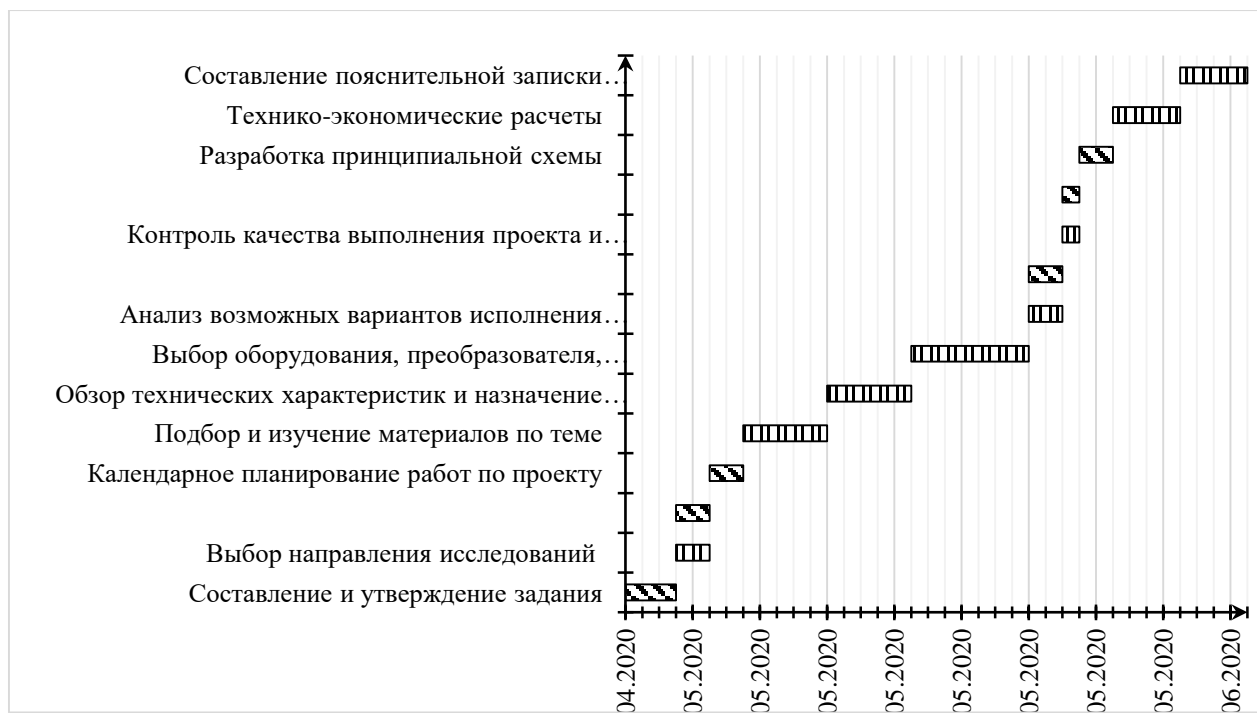


Таблица 16 – Сводная таблица по календарным дням

	Количество дней
Общее количество календарных дней для выполнения работы	36
Общее количество календарных дней, в течение которых работал инженер	31
Общее количество календарных дней, в течение которых работал руководитель	10

В результате выполнения подраздела был разработан план-график выполнения этапов работ для руководителя и инженера, позволяющий оценить и спланировать рабочее время исполнителей, а также рассчитано количество дней, в течение которых работал каждый из исполнителей.

6.2.3 Бюджет научно-технического исследования

При планировании бюджета научно-технического исследования учитывались все виды расходов, связанных с его выполнением. В этой работе использовать следующую группировку затрат по следующим статьям:

- материальные затраты научно-исследовательской работы (НИР);
- затраты на специальное оборудование для экспериментальных работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы НИР.

6.2.3 Расчет материальных затрат научно-технического исследования

Материальные затраты — это затраты организации на приобретение сырья и материалов для создания готовой продукции.

В данном разделе будет составлен бюджет проекта, который учитывает все расходы, которые будут затрачены при выполнении проекта.

Таблица 17 –Материальные затраты

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Кол-во, ед.	Сумма, руб.
Ручка шариковая	46	4	184
Карандаш	30	4	120
Тетрадь	25	2	50
Бумага офисная «Снегурочка» 500 листов	286	1	286
Картридж для принтера	2600	1	2600
Итого:			3240

Цены приняты на основании прайс-листа поставщика материалов:
<https://www.kantsler.ru/index.php?ukey=home>

6.2.4 Расчет амортизации специального оборудования

Расчет сводится к определению амортизационных отчислений, так как оборудование было приобретено до начала выполнения данной работы и эксплуатировалось ранее, поэтому при расчете затрат на оборудовании учитываем только рабочие дни по данной теме.

Расчет амортизации проводится следующим образом:

Норма амортизации: рассчитывается по формуле:

$$H_A = \frac{1}{n},$$

где n – срок полезного использования в количестве лет.

Амортизация оборудования рассчитывается по формуле:

$$A = \frac{H_A I}{12} \cdot m,$$

где I – итоговая сумма, тыс. руб.; m – время использования, мес.

Таблица 18 – Затраты на оборудование

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во ед.	Срок полезного использования, лет	Время использования, мес.	H_A , %	Цена оборудования, руб.	Амортизация
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Двигатель АМТКФ132L6	2	10	0,33	0,1	62432	171,68
2	Редуктор 1Ц2У-200-25-12	2	5	0,33	0,07	55200	303,6
3	Коммутационная аппаратура	2	10	0,33	0,07	30360	83,49
4	Преобразователь частоты	2	10	0,33	0,1	57196	157,29
5	Ноутбук с ПО	1	3	1,18	0,33	36500	1196,4
Итого:		1912,4 руб.					

6.2.5 Основная заработная плата исполнителей темы

В данном разделе рассчитывается заработная плата инженера и руководителя, помимо этого необходимо рассчитать расходы по заработной плате, определяемые трудоемкостью проекта и действующей системой оклада.

Основная заработная плата $Z_{осн}$ одного работника рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{осн} = Z_{дн} \cdot T_p,$$

где $Z_{дн}$ – среднедневная заработная плата, руб.; T_p – продолжительность работ, выполняемых работником, раб.дн. (таблица 19).

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

Для шестидневной рабочей недели (рабочая неделя руководителя):

$$Z_{дн} = \frac{Z_m \cdot M}{F_0} = \frac{51285 \cdot 10,3}{246} = 2147,3 \text{ руб.},$$

где $З_m$ – месячный должностной оклад работника, руб.; F_∂ – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дней; M – количество месяцев работы без отпуска в течение года:

- при отпуске в 28 раб. дня – $M = 11,2$ месяца, 5-дневная рабочая неделя;
- при отпуске в 56 раб. дней – $M = 10,3$ месяца, 6-дневная рабочая неделя.

Для пятидневной рабочей недели (рабочая неделя инженера):

$$З_{\partial n} = \frac{З_m \cdot M}{F_\partial} = \frac{33150 \cdot 11,2}{213} = 1743,1 \text{ руб.}$$

Должностной оклад работника за месяц:

- для руководителя:

$$З_m = З_{mc} \cdot (1 + k_{np} + k_\partial) k_p = 26300 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 51285 \text{ руб.}$$

- для инженера:

$$З_m = З_{mc} \cdot (1 + k_{np} + k_\partial) k_p = 17000 \cdot (1 + 0,3 + 0,2) \cdot 1,3 = 33150 \text{ руб.},$$

где $З_{mc}$ – заработная плата, согласно тарифной ставке, руб.; k_{np} – премиальный коэффициент, равен 0,3; k_∂ – коэффициент доплат и надбавок, равен 0,2; k_p – районный коэффициент, равен 1,3 (для г. Томска).

Таблица 19 – Баланс рабочего времени исполнителей

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней	52/14	104/14
- выходные дни		
- праздничные дни		
Потери рабочего времени	48/5	24/10
- отпуск		
- невыходы по болезни		
Действительный годовой фонд рабочего времени	246	213

Таблица 20 – Расчет основной заработной платы исполнителей

Исполнители НИ	$З_{мс}, руб$	k_{np}	k_o	k_p	$З_m, руб$	$З_{он}, руб$	$T_p, раб.дн.$	$З_{осн}, руб$
Руководитель	26300	0,3	0,2	1,3	51285	2147,3	10	21473
Инженер	17000	0,3	0,2	1,3	33150	1743,1	31	54036,1
Итого:								75509,1

Дополнительная заработная плата определяется по формуле:

– для руководителя:

$$З_{доп} = k_{доп} \cdot З_{осн} = 0,15 \cdot 21473 = 3220,9 \text{ руб.}$$

– для инженера:

$$З_{доп} = k_{доп} \cdot З_{осн} = 0,15 \cdot 54036,1 = 8105,4 \text{ руб.},$$

где $k_{доп}$ – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимаем равным 0,15).

6.2.6 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Отчисления во внебюджетные фонды определяется по формуле:

– для руководителя:

$$З_{внеб} = k_{внеб} (З_{осн} + З_{доп}) = 0,3 \cdot (21473 + 3220,95) = 7408,2 \text{ руб.}$$

– для инженера:

$$З_{внеб} = k_{внеб} (З_{осн} + З_{доп}) = 0,3 \cdot (54036,1 + 8105,4) = 18642,5 \text{ руб.},$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд ОМС и социальное страхование). Общая ставка взносов составляет в 2020 году – 30% (ст. 425, 426 НК РФ).

6.2.7 Накладные расходы

Накладные расходы включают в себя следующие расходы: печать ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи и т.д. Сумма

5 статьи затрат, рассчитанных выше, приведена в таблице ниже и используются для расчета накладных расходов.

Таблица 21 – Группировка затрат по статьям

Статьи					
1	2	3	4	5	6
Амортизация	Сырье, материалы	Основная заработная плата	Дополнительная заработная плата	Отчисления на социальные нужды	Итого без накладных расходов
1912,4	3240	75509,1	11326,3	26050,7	118038,5

Величина накладных расходов определяется по формуле (4.16):

$$Z_{\text{накл}} = (\text{сумма статей } 1 \div 5) \cdot k_{\text{нр}},$$

где $k_{\text{нр}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы. Величина коэффициента принимается равной 0,2.

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется бюджет по форме, приведенной в таблице 22. В таблице также представлено определение бюджета затрат двух конкурирующих научно-исследовательских проектов.

Таблица 22 – Группировка затрат по статьям

№	Наименование статьи	Сумма, руб.			Примечание
		Текущий Проект	Исп.2	Исп.3	
1	Материальные затраты НИР	3240	3240	3240	Пункт 4.2.3.1
2	Затраты на специальное оборудование	1912,4	1914,5	2093,2	Пункт 4.2.3.2
3	Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	75509,1	75509,1	75509,1	Пункт 4.2.3.3

4	Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	11326,3	11326,3	11326,3	Пункт 4.2.3.3
5	Отчисления во внебюджетные фонды	26050,7	26050,7	26050,7	Пункт 4.2.3.4
6	Накладные расходы	23607,7	23616,3	2368,2	Пункт 4.2.3.5
Бюджет затрат НИР		118038,5	118081,7	118341	Сумма ст. 1- 6

6.3 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Для определения эффективности исследования рассчитан интегральный показатель эффективности научного исследования путем определения интегральных показателей финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получен в процессе оценки бюджета затрат трех вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принят за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносится финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки рассчитывается как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}},$$

где $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$ – интегральный финансовый показатель разработки;

Φ_{pi} – стоимость i -го варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения.

$\Phi_{\text{текущ.проект}} = 118038,5 \text{руб}$, $\Phi_{\text{исп.1}} = 118081,7 \text{руб}$, $\Phi_{\text{исп.2}} = 118341 \text{руб}$.

$$I_{\text{финр}}^{\text{тек. пр.}} = \frac{\Phi_{\text{тек. пр.}}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{118038,5}{118341} = 0,996;$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп. 2}} = \frac{\Phi_{\text{исп. 2}}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{118081,7}{118341} = 0,997;$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп. 3}} = \frac{\Phi_{\text{исп. 3}}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{118341}{118341} = 1.$$

В результате расчета консолидированных финансовых показателей по трем вариантам разработки вариант 1 (текущий проект) с меньшим перевесом признан считается более приемлемым с точки зрения финансовой эффективности. Столь малое отличие значений интегрального показателя разработки обусловлено малым сроком использования оборудования (для снятия характеристик и настройки регуляторов).

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов выполнения НИР (I_{pi}) определен путем сравнительной оценки их характеристик, распределенных с учетом весового коэффициента каждого параметра (таблица 23).

Таблица 23 – Сравнительная оценка характеристик вариантов НИР

Критерии	Весовой коэффициент	Бальная оценка базового варианта	Бальная оценка аналога 1	Бальная оценка аналога 2
1. Надежность	0,2	4	4	5
2. Стабильность работы	0,2	5	5	4
3. Обеспечение заданных параметров работы	0,3	5	3	2
4. Ремонтпригодность	0,15	5	4	4
5. Простота эксплуатации	0,15	4	4	5
Итого:	1	4,65	3,9	3,75

Расчет интегрального показателя для разрабатываемого проекта:

$$I_{p1} = 0,2 \cdot 4 + 0,2 \cdot 5 + 0,3 \cdot 5 + 0,15 \cdot 5 + 0,15 \cdot 4 = 4,65;$$

$$I_{p2} = 0,2 \cdot 4 + 0,2 \cdot 5 + 0,3 \cdot 3 + 0,15 \cdot 4 + 0,15 \cdot 4 = 3,9;$$

$$I_{p3} = 0,2 \cdot 5 + 0,2 \cdot 4 + 0,3 \cdot 2 + 0,15 \cdot 4 + 0,15 \cdot 5 = 3,75.$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки вычисляется на основании показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{исп.i} = \frac{I_{p-исп.i}}{I_{финр}^{исп.i}}.$$

$$I_{исп.1} = \frac{4,65}{0,996} = 4,67; \quad I_{исп.2} = \frac{3,9}{0,997} = 3,91; \quad I_{исп.3} = \frac{3,75}{1} = 3,75.$$

Далее интегральные показатели эффективности каждого варианта НИР сравнивались с интегральными показателями эффективности других вариантов с целью определения сравнительной эффективности проекта (таблица 24).

Таблица 24 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Текущий проект	Исп.2	Исп.3
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,996	0,997	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,65	3,9	3,75
3	Интегральный показатель эффективности	4,67	3,91	3,75
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0,83	0,8

Сравнение среднего интегрального показателя сопоставляемых вариантов позволило сделать вывод о том, что наиболее финансово- и ресурсоэффективным является вариант 1 (текущий проект). Наш проект является более эффективным по сравнению с конкурентами.

Выводы по разделу

В результате выполнения целей раздела можно сделать следующие выводы:

1. Результатом анализа конкурентных технических решений является выбор одного из вариантов реализации НИР как наиболее подходящего и оптимального по сравнению с другими.

2. В ходе планирования для руководителя и инженера был разработан график реализации этапа работ, который позволяет оценивать и планировать рабочее время исполнителей. Определено следующее: общее количество дней для выполнения работ составляет 36 дней; общее количество дней, в течение которых работал инженер, составляет 31 день; общее количество дней, в течение которых работал руководитель, составляет 10 дней;

3. Для оценки затрат на реализацию проекта разработан проектный бюджет, который составляет 118038,5руб;

4. Результат оценки эффективности ИР показывает следующие выводы:

1) значение интегрального финансового показателя ИР составляет 0,90, что является показателем того, что ИР является финансово выгодной по сравнению с аналогами;

2) значение интегрального показателя ресурсоэффективности ИР составляет 4,65, по сравнению с 3,9 и 3,75;

3) значение интегрального показателя эффективности ИР составляет 4,67, по сравнению с 3,91 и 3,75, и является наиболее высоким, что означает, что техническое решение, рассматриваемое в ИР, является наиболее эффективным вариантом исполнения.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
3-5Г5А1	Тошболтаев Шавкат Мумин угли

Школа	ИШЭ	Отделение (НОЦ)	ОЭЭ
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

Тема ВКР:

ВКР: Частотно-регулируемый электропривод механизма подъёма мостового крана грузоподъёмностью 35 тонн.	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объектом исследования является электропривод мостового крана. Кран применяется для транспортировки различных грузов в разных промышленных отраслях и предприятиях
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	1) ГОСТ Р ИСО 26000-2012. Руководство по социальной ответственности; 2) N 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» 3) N 426-ФЗ «О специальной оценке условий труда» 4) ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация»
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	Анализ следующих вредных и опасных факторов: <ul style="list-style-type: none"> • повышенный уровень шума; • повышенный уровень вибрации; • отклонение параметров микроклимата; • недостаточная освещённость рабочей зоны; • поражение электрическим током; • движущие части машин и механизмов.
3. Экологическая безопасность:	Анализ воздействия на литосферу: образование отходов в результате деятельности цеха
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	Возможные ЧС техногенного характера: - пожар – взрыв Типичная ЧС: пожар.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Мезенцева И.Л.			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5Г5А1	Тошболтаев Шавкат Мумин угли		

7 Социальная ответственность

В данном разделе проекта описан анализ вредных и опасных факторов при наладке и эксплуатации электропривода подъемника лебедки мостового крана грузоподъемностью 35 тонна, мероприятия по устранению вредных и опасных факторов, анализ мероприятий по предотвращению пожаров и возгораний.

Главное в решении проблемы безопасности труда – забота о человеке, но немаловажное значение имеет устранение и экономических потерь, вызываемых травматизмом и профессиональными заболеваниями. Улучшение условий труда и обеспечение безопасности производимых работ способствует производительности труда. Работы, производимые при монтаже и наладке электропривода, непосредственно связаны с применением электроэнергии.

Рабочим местом машиниста мостового электрического крана является кабина управления краном. Правильная, научно обоснованная организация рабочего места, учитывающая физиологические особенности организма человека и конкретные условия эксплуатации крана, способствует повышению производительности труда машиниста. Поэтому при организации рабочего места машиниста учитываются эргономические показатели кабины управления оптимальные значения параметров микроклимата, освещенность рабочей площадки и т. п. Конструкция кабины должна обеспечивать хороший обзор любой точки рабочей площадки, защиту машиниста от избыточного тепла, шума и вибраций, электробезопасность, легкость и удобство управления краном (ГОСТ 27584-88) [1].

7.2 Правовые и организационные вопросы

7.2.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства

До работ на кране допускаются только обученные и аттестованные крановщики не моложе 18 лет, имеющие образование не ниже 8 классов,

годные по состоянию здоровья, что должно быть подтверждено результатами медицинского освидетельствования.

В соответствии со ст. 104 ТК РФ[1] допускается введение суммированного учета рабочего времени с учетным периодом три месяца. В случае, если по причинам сезонного и (или) технологического характера, установленная продолжительность рабочего времени не может быть соблюдена в течение учетного периода продолжительностью три месяца, отраслевым (межотраслевым) соглашением и коллективным договором может быть предусмотрено увеличение учетного периода для учета рабочего времени таких работников, но не более чем до одного года. При этом продолжительность рабочего времени за учетный период не может превышать нормального числа рабочих часов.

Согласно ст.117 ТК РФ работникам предоставляется ежегодный дополнительный оплачиваемый отпуск в силу условий труда, минимальная продолжительность которого составляет 7 календарных дней.

Правовое обеспечение безопасности жизнедеятельности на производстве включает законодательство о труде и охране труда. Основными законами, на основе которых осуществляется управление охраной труда, являются Федеральный закон «Об основах охраны труда в Российской Федерации» от 17 июля 1999 г. № 181-ФЗ; Трудовой кодекс РФ, принятый 30 декабря 2001 г.; Гражданский кодекс РФ.

Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны:

Для подъема на рабочее место машиниста на экскаваторе должна быть установлена безопасная лестница с высотой перил от поверхности ступени 850-950 мм.

Дверной проем должен иметь высоту не менее 1900 мм, ширину не менее 650 мм (для исполнения ХЛ - не менее 750 мм) с учетом уплотнения. Запорное устройство и уплотнение должны обеспечивать герметичность и безотказное открывание и закрывание двери.

Кресло должно создавать условия для поддержания корпуса человека в физиологически рациональном положении, в том числе за счет профилирования спинки и сиденья, а также обеспечивать условия для отдыха. Кроме того, кабина крановщика должна быть оборудована средствами или устройствами:

- 1) для предотвращения запотевания и обмерзания стекол при температуре наружного воздуха до минус 40 °С, по требованию заказчика для исполнения ХЛ по ГОСТ 15150 - до минус 55 °С;
- 2) для защиты глаз машиниста от прямых солнечных лучей (солнцезащитные козырьки, тонированные стекла и др.);
- 3) для очистки наружной поверхности лобового стекла от загрязнения и атмосферных осадков, обеспечивающими рациональные зоны очистки;
- 4) для установления, регулирования и поддержания комфортных микроклиматических условий;
- 5) для аварийного покидания кабины.

Остекление кабины должно быть устойчивым к механическому воздействию по ГОСТ 5727-88. Окна должны иметь форточки или частично открываться. Стекла по периметру должны иметь вибродемпфирующую прокладку.

7.2.2 Анализ вредных и опасных факторов

Таблица 25 - Возможные вредные и опасные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разра-ботка	Изготовление	Эксплуатация	
1. . Повышенный уровень шума		+	+	- СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03.

2. Повышенный уровень вибрации		+	+	Санитарно- эпидемиологические правила и нормативы «Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы».[2] - СанПиН 2.2.1/2.1.1.1278–03.
3. Отклонение параметров микроклимата	+	+	+	Гигиенические требования к естественному, искусственному и совмещённому освещению жилых и общественных зданий[2]. - СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых общественных зданий и на территории застройки. [6] - СанПиН 2.2.4.548–96.
4. Недостаточность освещения рабочей зоны	+	+	+	Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.[4] - ГОСТ 12.1.038-82
5. Поражение электрическим током	+	+	+	ССБТ. Электробезопасность Предельно допустимые уровни напряжений[прикосновения и токов.: [9] - СП 52.13330.2016.
6. Движущиеся части машин и механизмов	+	+	+	Естественное и искусственное освещение. - СН 2.2.4/2.1.8.566-96. Санитарные нормы. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий [7]

Превышенный уровень шума

Из наиболее распространенных в производстве вредных факторов являются шум. В данной работе следует выделить следующие группы источников:

- шум механического происхождения, возникающий при вибрации поверхностей оборудования, а также при одинарных или периодических ударах в соединениях деталей и или конструкциях;

- шум электромагнитного происхождения, возникающий вследствие колебаний электрических устройств (ротора, статора) под действием переменных магнитных полей.

Шум и вибрация вызывают головную боль, быструю утомляемость, бессонницу или сонливость, ослабляет внимание, ухудшается память, снижается реакция. В таблице 2 указаны допустимые уровни звукового давления, превышение которых не допускается при выполнении основной работы [3]

Значения представлены в табл. 26 (для постоянных шумов).

Рабочее место	Уровни звукового давления (дБ) в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровни звука дБА
	31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Конструкторское бюро, программисты, лаборатория	86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Превышенный уровень вибрация

Источником вибрации является работающий электромашинный агрегат. По [9] уровень вибрации не должен превышать 88 дБ. Мерой по защите персонала от повышенного уровня вибрации является ограничение контакта работника с вибрацией; Вибрации при работе мостового крана возникают как в вертикальной, так и в горизонтальной плоскостях. Допустимый уровень вибрации представлен в таблице 27. Вертикальные колебания кранового моста имеют диапазон частот-1,5–8,0 Гц. Горизонтальные колебания, которые передаются кабине управления в результате раскачивания груза, – диапазон частот 0,2–1,0 Гц. Учитывая, что резонансная частота колебаний органов человеческого тела находится в диапазоне частот 1 – 15 Гц, машинист подвергается вертикальным колебаниям наиболее неблагоприятного спектра.

Таблица 27 – Допустимый уровень вибрации [6]

Вид вибрации	Допустимый уровень виброскорости, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц										
	1	2	4	8	16	31,5	63	125	250	500	1000
Общая транспортная:											
вертикальная	132	123	114	108	107	107	107	-	-	-	-
горизонтальная	122	117	116	116	116	116	116	-	-	-	-

При выполнении работ по реконструкции крана уровни шума и вибрации незначительны и удовлетворяют требованиям стандартов.

В неавтоматизированных производствах осуществляются следующие методы снижения вибраций:

- в источнике возникновения;
- снижение их на путях распространения;
- путём соответствующей организации труда, а также применение средств индивидуальной защиты и лечебно профилактические мероприятия.

Для защиты рук от воздействия локальной вибрации применяют рукавицы и перчатки следующих видов:

- полностью изготовленные из виброзащитного материала;
- со специальными упругодемпфирующими вкладками.

При работе в условиях общей вибрации применяют спец. обувь.

Отклонение параметров микроклимата.

Значимым физическим фактором является микроклимат рабочей зоны (температура, влажность и скорость движения воздуха).

Температура, относительная влажность и скорость движения воздуха влияют на теплообмен и необходимо учитывать их комплексное воздействие. Нарушение теплообмена вызывает тепловую гипертермию, или перегрев.

Человек будет чувствовать себя абсолютно комфортно, если влажность окружающего его воздуха будет колебаться в пределах от 40 до 60%. Это и есть нормальная влажность воздуха. В случаях снижения влажности ниже 40%, практически все здоровые люди начинают испытывать сонливость, рассеянность, ощущать чувство сухости кожи и раздражение слизистых оболочек.

По ГОСТ 12.1.005 – 88 оптимальная норма относительной влажности воздуха в рабочих местах при тяжелых категориях работ составляет 40-60 %. Допустимая норма относительной влажности воздуха при тяжелых категориях работ в холодный период года не более 75%, в теплый период года не более 65% (при 260С) [5]. Оптимальные и допустимые параметры микроклимата для машиниста крана представлены в таблице 28.

Таблица 28 – Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах

Период года	Категория работ по уровню энергозатрат, Вт	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	III (более 290)	16-18	15-19	60-40	0,3
Теплый	III (более 290)	18-20	17-21	60-40	0,3

Для обеспечения нормального микроклимата предусматривается, в соответствии с Сан ПиН 2.2.4.548 – 96, следующее:

- вентиляция приточно-вытяжная по установка центробежных вентиляторов. Кратность воздухообмена 1;
- установка систем воздушного отопления, совмещённых с вентиляцией;

Недостаточная освещенность рабочего зоны.

Источниками света могут быть как естественные, так и искусственные объекты. Естественным источником в помещении служит солнце, искусственными являются электрические лампочки. При длительной работе в усло-

виях недостаточной освещенности и при нарушении других параметров световой среды зрительное восприятие снижается, развивается близорукость, болезнь глаз, появляются головные боли.

Для безопасной эксплуатации грузоподъемного оборудования очень важно обеспечить видимость зоны выполнения работ, а также освещенность на мосту или тележке при выполнении наладочных и ремонтных работ.

Необходимость постоянного кранового освещения в обязательном порядке предусматривается для:

- кабины машиниста;
- аппаратных кабин и помещений, где размещаются узлы;
- подкрановую зону при выполнении работ.

Для ориентировочного подсчета за освещенность в 1 лк можно принимать светильник мощностью 0,25 Вт, которая приходится на-1 м² освещаемой площади. Искусственное освещение должно быть установлено так, чтобы световые лучи не мешали машинисту следить за перемещением груза. Для обеспечения безопасности выполнения работ при эксплуатации кранов необходима хорошая освещенность рабочей площадки, и перемещаемого груза, поэтому светильник следует устанавливать на стрелах кранов.

Нормативы освещенности на рабочих местах согласно СП 52.13330.2016 – «Естественное и искусственное освещение» приведены в таблице ниже

Таблица 29 – Нормативы освещенности на рабочих местах

Характеристика зрительной работы	Минимальный размер объекта, мм	Разряд зрительной работы	Контраст объекта с фоном	Характеристика фона	Освещенность при общем освещении, лк	Естественное освещение КЕО, %	Совместное освещение КЕО, %
Средней точности	0.5.1.0	IV _в	Средний	средний	400	4	2.4

Малой точности	1.0.5.0	V _B	Средний	средний	150	3	1.8
----------------	---------	----------------	---------	---------	-----	---	-----

Поражение электрическим током:

Источником напряжения в электроприводе механизма перемещения фурмы являются токоведущие части электропривода.

Основными непосредственными причинами электротравматизма, являются:

- 1) прикосновение к токоведущим частям электроустановки, находящейся под напряжением;
- 2) прикосновение к металлическим конструкциям электроустановок, находящимся под напряжением;
- 3) ошибочное включение электроустановки или несогласованных действий обслуживающего персонала;
- 4) поражение шаговым напряжением и др.

Основными техническими средствами защиты, согласно ПУЭ, являются защитное заземление, автоматическое отключение питания, устройства защитного отключения, изолирующие электрозащитные средства, знаки и плакаты безопасности. Наличие таких средств защиты предусмотрено в рабочей зоне. В целях профилактики периодически проводится инструктаж работников по технике безопасности.

К коллективным средствам защиты от поражения электрическим током относят:

Оградительные устройства; устройства автоматического контроля и сигнализации; изолирующие устройства и покрытия; устройства защитного заземления и зануления; устройства автоматического отключения; устройства выравнивания потенциалов и понижения напряжения; устройства дистанционного управления; предохранительные устройства; молниеотводы и разрядники; знаки безопасности.

К основным средствам защиты от поражения электрическим током относятся: в электроустановках до 1000В

- диэлектрические перчатки;
- изолирующие штанги;
- изолирующие и электроизмерительные клещи;
- указатели напряжения;
- слесарно-монтажный инструмент с изолирующими рукоятками;

К дополнительным средствам защиты до 1000В относятся:

- диэлектрические галоши;
- диэлектрические ковры;
- изолирующие подставки.

7.3 Экологическая безопасность

Проблема защиты окружающей среды - одна из важнейших задач современности. Выбросы промышленных предприятий в атмосферу, водоёмы и недра на современном этапе развития достигли таких размеров, что в ряде районов земного шара, особенно в крупных промышленных центрах, уровень загрязнений существенно превышает допустимые санитарные нормы.

Загрязняющими веществами, выбрасываемыми в атмосферу в результате работы инструментального цеха, являются – пыль металлическая (оксиды железа), пыль абразивная, оксиды цинка.

Меры по предотвращению загрязнений атмосферы.

Основными путями снижения и полной ликвидации загрязнения атмосферы служат: разработка и внедрение очистных фильтров на предприятиях, использование экологически безопасных источников энергии, безотходной технологии производства.

Один из способов предохранения атмосферы от загрязнения – переход на новые экологически безопасные источники энергии. Например, строительство электростанций, использующих энергию приливов и отливов, тепло недр,

применение гелиоустановок и ветряных двигателей для получения электроэнергии.

Вода используется для вспомогательных целей: охлаждение (подогрева) исходных материалов и продукции предприятия, охлаждение деталей и узлов технологического оборудования, промывки и очистки продукции, что приводит к загрязнению воды растворимыми и нерастворимыми примесями; хозяйственно бытового обслуживания работников предприятия.

Важное сокращение количества сбрасываемой в естественные водоемы воды, использованной в качестве хладагента, решается тремя путями. Первый путь - это переход от прямоточного охлаждения (водоем-холодильник или конденсатор нефтепродукта-водоем) на замкнутую систему оборотного охлаждения с подпиткой этой системы свежей водой для компенсации потерь воды от испарения. Переход на оборотное водоснабжение систем охлаждения в нефтепереработке в настоящее время используется на всех НПЗ. Это позволило резко сократить расход свежей воды, однако усложнило систему охлаждения. Кроме того, в градирнях вода охлаждается за счет испарения ее части, а испаряющаяся вода уносит с собой в атмосферу и следы легких нефтепродуктов. В экологическом отношении системы оборотного водоснабжения тоже небезупречны.

Работа сопровождается образованием производственных отходов, а также отходов, приравненных к твердым коммунальным. В инструментальном цехе осуществляется ремонт инструментов, оснастка и производство специального инструмента, в результате этих процессов образуются отходы – лом цветных и черных металлов (втулки, катушки, провода, шестерни и т. д.). Твердые отходы 4-5 классов опасности собираются в контейнеры и по мере накопления (не реже одного раза в месяц) вывозятся на объекты размещения отходов. Отработанные люминесцентные лампы 1-го класса опасности подлежат временному накоплению, а затем передаются в специализированные организации для утилизации.

Из этого можно сделать простой вывод, что необходимо стремиться к снижению ресурсо- и энергопотребления, то есть разрабатывать и внедрять электрооборудование с малым энергопотреблением.

7.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Пожаром называется неконтролируемое горение вне специального очага, наносящего материальный ущерб. Согласно ГОСТ 12.1.033-81 понятие пожарная безопасность означает состояние объекта, при котором с установленной вероятностью исключается возможность возникновения и развития пожара и воздействия на людей опасных факторов пожара, а также обеспечивается защита материальных ценностей.

Пожарная безопасность является одним из важнейших разделов охраны труда на производстве. Существенную роль в профилактике и предотвращении пожаров играет правильный выбор режима работы электрооборудования с учётом класса по пожароопасности. Все производственные помещения по пожароопасности разделяются на пять основных категорий. В процессе получения изделия на линии видимые признаки, обуславливающие возникновения пожара, отсутствуют и, следовательно, данное производство согласно [16] можно отнести к категории «Д» (Категория пожароопасности Д предназначена для производств, в которых используются, в холодном состоянии, негорючие вещества и материалы). Помещение по пожарной опасности относится к классу П-1 (ПУЭ). Однако, в данном технологическом процессе пожар может возникнуть из-за таков короткого замыкания, вызывающих высокую температуру нагревания проводников, что приводит к их выплавлению из изоляционного материала. В этом отношении опасны недопустимые электрические перегрузки проводов и обмоток электрических машин. В местах плохого контакта соединения проводников вследствие большого переходного сопротивления выделяется большое количество тепла. Это приводит к повышению температуры и воспламенения изоляции. Были установлены

общие требования пожарной безопасности к объектам различного назначения всех отраслей народного хозяйства при строительстве и эксплуатации. Пожарная безопасность должна обеспечиваться:

- системой предотвращения пожара;
- системой противопожарной защиты;
- организационно-техническими мероприятиями.

Системы предотвращения пожара и противопожарной защиты, обеспечивающих сохранность материальных ценностей, следует применять при наличии экономической эффективности от их внедрения. Экономическая эффективность должна рассчитываться с учётом вероятности возникновения пожара и возможного ущерба от него. Предотвращение пожара должно достигаться предотвращением образования горючей среды. Это должно обеспечиваться минимально возможным применением горючих материалов.

Автоматические установки пожаротушения и установки пожарной сигнализации, введённые в объект, должны удовлетворять требованиям проектной документации и отраслевым стандартам.

Огнетушители различных видов относятся к классу переносных средств пожаротушения. Огнетушители, годные к эксплуатации, должны иметь бирку и маркировку и должны быть окрашены в красный цвет. Зарядка и перезарядка всех типов огнетушителей должна выполняться в соответствии с инструкциями по эксплуатации. Огнетушители должны располагаться в заметных и легкодоступных местах, где исключено попадание солнечных лучей. Количество первичных средств пожаротушения определяется по [16]:

Пожарный ручной инструмент и инвентарь, размещенный на объекте, подлежит периодическому обслуживанию, включающему следующее:

1. Очистка от пыли, грязи и коррозии;
2. Восстановление соответствующей окраски.

Ящики с песком должны быть укомплектованы лопатой и иметь вместимость до 3 м³.

На рабочем месте каждый станок должен быть оснащен защищенной аппаратурой. Должна быть предусмотрена блокировка и защита на случай короткого замыкания и перегрузок, обеспечения возможности снятия напряжения всего оборудования с помощью расположенных вне помещения рубильников. Для курения должны быть отведены специальные места. В производственных помещениях должна обеспечиваться возможность эвакуации людей и оборудования в случае пожара. План эвакуации на случай пожара представлен на рисунке 45.

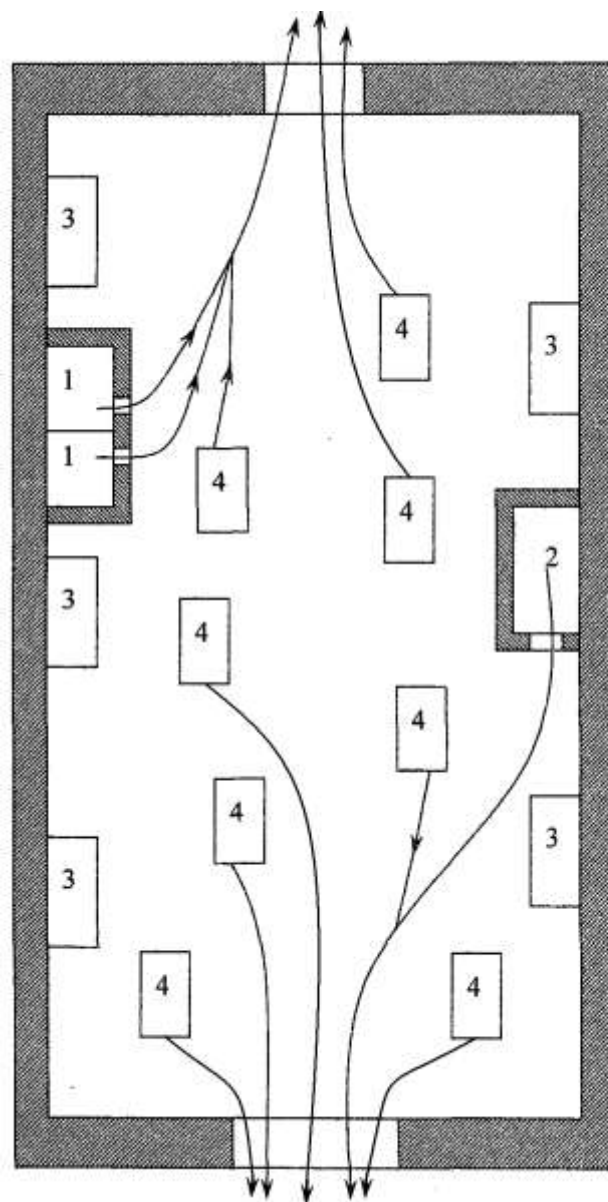


Рис. 45 – План эвакуации на случай пожара: 1- руководство цеха; 2- ОТК; 3- первичные средства пожаротушения; 4- рабочие места

Выводы по разделу

В разделе «Социальная ответственность» проанализированы и определены вредные и опасные факторы среды, рассмотрены меры и мероприятия по снижению воздействия на лиц, эксплуатирующий мостового кран. В ходе работы проанализированы негативные воздействия на окружающую среду, рассмотрены возможные чрезвычайные ситуации при работе в процессе эксплуатации привода мостового крана. Помимо этого, были рассмотрены правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности. На основании полученных данных можно дать рекомендации по ограничению и исключению действия вредных факторов на лиц, эксплуатирующих мостовые краны путем обязательного применения индивидуальных средств защиты. Для исключения воздействия опасных факторов необходимо оснастить рабочее место оператора предохранительными блокировочными устройствами, следить за целостностью постоянных ограждений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе был рассмотрен и рассчитан частотно–регулируемый электропривод механизма подъема крана. На основе анализа требования, предъявляемых к электроприводу, выбран крановый электродвигатель, предназначенный для частотного регулирования, и преобразователь частоты, обеспечивающий требуемый набор функций управления. В качестве способа управления выбрано векторное управление.

В процессе выполнения работы была определена область работы, рассчитаны параметры схемы замещения двигателя и его характеристики, определены параметры механической системы электропривода подъема. Выполнена оптимизация контуров регулирования линейной САУ РЭП. Предложено использовать ПИ–регуляторы тока, скорости и потокосцепления системы автоматического управления регулируемого электропривода и П-регулятор положения для следящего электропривода. Даны рекомендации по настройке регуляторов и определены ожидаемые показатели качества работы контуров регулирования.

Для проведения имитационных исследований в среде *Simulink* разработаны имитационные модели основных функциональных элементов с учетом нелинейности их характеристик, а также схемы набора моделей для исследования электропривода в режиме регулирования скорости и позиционирования с учетом упругости элементов кинематической цепи. В результате выполнения имитационных экспериментов установлено, что использование асинхронного частотно-регулируемого электропривода в механизме подъема крана позволяет осуществлять плавный разгон и торможение двигателя в соответствии с заданной временной зависимостью, обеспечивая плавное протекание переходных процессов и снижение динамических нагрузок в элементах кинематической цепи, тем самым гарантируя выполнение заданных технических требований.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Ласточкин В.М., Машин А. Е. Реализация энергосберегающих технологий в крановых электроприводах // Поъемно-транспортное оборудование.
- 2 Макаров А. А. Двигатели новой серии для частотно–регулируемого электропривода кранов // Электричество. – 2005. – №5.
- 3 Яуре А. Г. Певзнер Е. М. Крановый электропривод: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 334 с.
- 4 Удуд Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 8. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод: учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2009. – 448 с.
- 5 Чернышев А. Ю., Чернышев И. А. Расчет характеристик электроприводов переменного тока. Ч. 1. Асинхронный электродвигатель: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 136 с.
- 6 Удуд Л.О, Мальцева О.П. Кояин Н.В. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч 6. Механическая система электропривода. – издание 2–е переработанное и дополненное – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 148 с
- 7 Удуд Л.О, Мальцева О.П. Кояин Н.В. Системы управления электроприводов: Учебное пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 152 с.
- 8 ATV71 KATALOG. 2009. – 260 pp.
- 9 Ласточкин В.М., Шамрай Ф.А. Методика по силовому расчету частотно–регулируемых электроприводов крановых механизмов. – техническая коллекция Schneider Electric, 2007 г., 19 с.
- 10 Сокольский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для студ. высш. учеб. заведений. – М.: Изд-кий центр «Академия», 2006 – 272с.

11 Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Ч. 4 Теория оптимизации непрерывных многоконтурных систем управления электроприводов: учебное пособие / Л.С. Удут, О.П. Мальцева, Н.В. Кояин. – Томск: Издательство Томского политехнического университета, 2007. – 164 с.

12 Поздеев А.Д. Электромагнитные и электромеханические процессы в частотно–регулируемых асинхронных электроприводах. – Чебоксары: Изд-во Чуваш ун-та, 1998. 172 с.

13 Черных И.В. Моделирование электрических устройств в *MATLAB*, *SimPowerSystems* и *Simulink* – СПб. ; М. : Питер : ДМК Пресс, 2008. — 288 с.

14 Шрейнер Р. Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.

15. Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197;

16. СанПиН 2.2.2/2.4.1.1340-03. «Гигиеническими требованиями к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы»; утв. постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 15.06.2003 г.

17. ГОСТ 12.0.003-2015. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация. М.: Стандартинформ, 2016.

18. СанПиН 2.2.4.548-96 «Гигиеническими требованиями к микроклимату производственных помещений»; утв. постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 13.06.2003 г.

19. СП 60.13330.2016. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха.– М.: Минрегион России, 2016

20. СН 2.2.4/2.1.8.562-96. «Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории жилой застройки»; утв. постановлением Госкомсанэпиднадзора РФ от 31.10.1996 г.

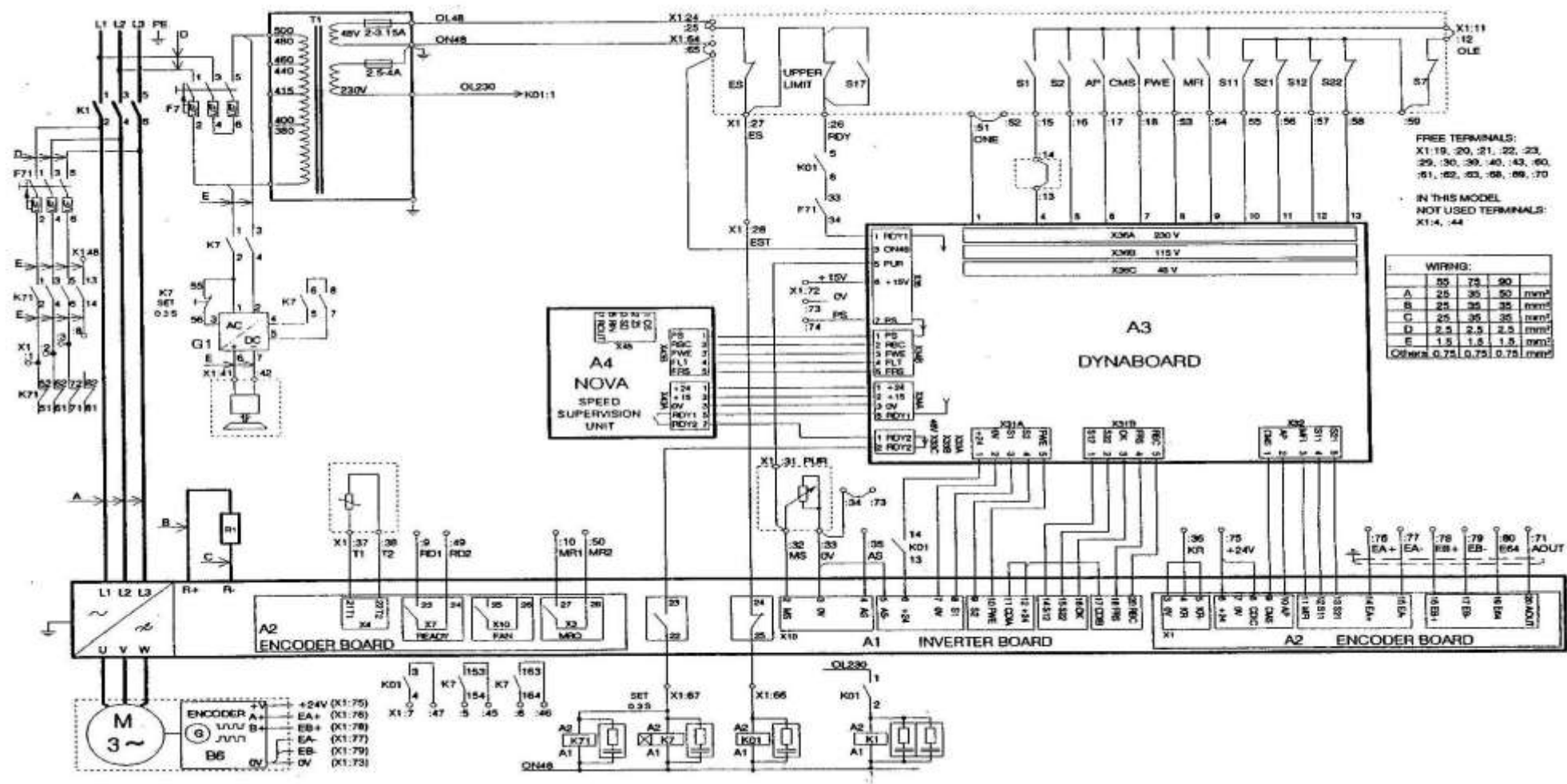
21. ГОСТ 12.1.007-76. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности.— М.: ИПК Издательство стандартов, 1976

22. СНиП 21-01-97 от 1998-01-01 Пожарная безопасность зданий и сооружений.

23. СН 2.2.4/2.1.8.566–96. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий.

Приложение А

Схема электрическая принципиальная электропривода механизма подъема крана



Приложение Б

Схема электрическая функциональная САУ электропривода механизма подъема крана

